

**Обзор исследований межсубъектной синхронизации активности  
структур головного мозга при социальных взаимодействиях методами  
гиперсканирования**

*Муртазина Е.П.,*

ФГБНУ “НИИ нормальной физиологии им. П.К. Анохина”, Москва, Россия,  
e.murtazina@nphys.ru

*Матюлько И.С.,*

ФГБНУ “НИИ нормальной физиологии им. П.К. Анохина”, Москва, Россия,  
irinamatulko@gmail.com

Нейрофизиологические механизмы социального поведения остаются недостаточно изученными. Растет число зарубежных исследований с использованием метода гиперсканирования, основанного на синхронной регистрации активности мозга нескольких субъектов социальных отношений. Несмотря на выдающуюся школу отечественной социальной психологии, в российской научной литературе немногочисленны нейрофизиологические исследования механизмов социальных взаимодействий. Цель работы – провести обзор исследований, использующих гиперсканирование для изучения синхронизации активности мозга при социальных взаимоотношениях. В статье рассмотрены методы регистрации и анализа мультисубъектных данных активности структур мозга, модели экспериментальных и натуралистических обследований, результаты исследований, а также прикладные и фундаментальные аспекты использования метода гиперсканирования. Внедрение методов, расширяющих понимание физиологических механизмов социальных отношений, может способствовать разработке подходов к повышению эффективности образовательного процесса и командной деятельности в различных профессиональных сферах, а также улучшению социального благополучия и психосоматического здоровья человека.

**Ключевые слова:** социальные взаимодействия, гиперсканирование, синхронизация мозговой активности, электроэнцефалография, магнитная энцефалография, БИК-спектроскопия, функциональная магнитно-резонансная томография.

*Муртазина Елена Павловна*, кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник, НИИ нормальной физиологии им. П.К. Анохина (ФГБНУ НИИ НФ), Москва, Россия. E-mail: e.murtazina@nphys.ru

*Матюлько Ирина Сергеевна*, младший научный сотрудник, НИИ нормальной физиологии им. П.К. Анохина (ФГБНУ НИИ НФ), Москва, Россия. E-mail: irinamatulko@gmail.com

Социальные взаимоотношения являются неотъемлемой частью жизни каждого человека и дают начало культуре, искусству, науке. Вопрос о социальной организации общества и роли индивидуума в нем – одна из актуальных проблем психологии [4]. Взаимодействия между людьми тесно связаны с феноменом социального мышления или социального сознания, в основе которого лежат сложные психологические и когнитивные процессы. Они включают внимание, память, планирование действий и восприятие различных внешних и внутренних сигналов, позволяющее субъектам взаимодействий понимать друг друга, обмениваться информацией и предсказывать действия других. Способность координировать свои действия с действиями других людей, называемая “общей интенциональностью”, относится к взаимодействиям, в которых индивиды имеют общую цель и распределяют свои роли для ее достижения.

Все более актуальным становится изучение нейрофизиологических основ социальных взаимодействий. Развитие нейросоциологии и внедрение передовых технологий открыли новые возможности для изучения нейрональных механизмов социального поведения не только отдельных индивидов, но и на уровне психофизиологических межсубъектных взаимосвязей.

Duane и Behrendt [22] первыми осуществили одновременную запись электроэнцефалограмм (ЭЭГ) и выявили взаимосвязи между ЭЭГ характеристиками двух человек. Эта многосубъектная техника длительное время не была востребована, но была возрождена Montague с соавторами и названа методом гиперсканирования [46]. Авторы использовали функциональную магнитно-резонансную томографию (фМРТ) для регистрации активности головного мозга одновременно у двух испытуемых с синхронизацией установок, находящихся в разных лабораториях. С тех пор благодаря совершенствованию сложных инструментальных методов регистрации, алгоритмов обработки данных растет число исследований, в которых осуществляется анализ взаимосвязей активности областей мозга [18] и соматовегетативных показателей [5] у людей при совместной деятельности.

Цель работы – рассмотреть методические аспекты и проанализировать результаты исследований, использующих метод гиперсканирования для изучения синхронизации нейрофизиологических процессов при социальных взаимодействиях.

**Методы мультисубъектной регистрации активности различных структур головного мозга** основываются на одновременной регистрации ЭЭГ, магнитоэнцефалограмм (МЭГ), фМРТ или спектроскопии в ближней инфракрасной области (БИК-спектроскопия). У каждого из этих методов имеются преимущества и недостатки, которые влияют на их применение в качестве инструментов гиперсканирования.

ЭЭГ имеет высокое временное разрешение и недорогое аппаратно-программное обеспечение. Кроме того, этот метод позволил накопить большое количество данных об индивидуальных нейрофизиологических механизмах различных когнитивных процессов. Благодаря этим преимуществам ЭЭГ стала наиболее часто используемым методом гиперсканирования [44]. Осуществлены разработки и проведены исследования с применением ЭЭГ-гиперсканирования в группах от 9 и более человек в условиях естественных взаимодействий [15]. Данные, полученные

с помощью сканеров потребительского класса на базе современных смартфонов или планшетов, оказались сопоставимыми с данными аналогичных экспериментов с использованием лабораторного оборудования [58], что доказывает их надежность для ЭЭГ-гиперсканирования. Разработаны системы, способные обеспечить запись ЭЭГ с частотой дискретизации 1 кГц в группах до 20 человек [40].

Для гиперсканирования все чаще используется магнитная энцефалография – метод, обладающий аналогичными ЭЭГ пространственно-временными характеристиками, но более низкой мобильностью. Разработана система для одновременной регистрации МЭГ-активности двух субъектов, общающихся в режиме реального времени по каналам аудио-видеосвязи между двумя лабораториями [76]. Эта разработка позволяет исследовать мозговую активность испытуемых с учетом вербальных, визуальных и двигательных компонентов социальных взаимодействий. МЭГ-гиперсканирование было применено для изучения взаимодействий между матерями и детьми [42], диктором и слушателем [45], лидером и последователем в задаче согласованных движений рук [77].

Системы фМРТ дороги и стационарны, что накладывает ограничения на мобильность испытуемых в процессе взаимодействий. Преимущество метода фМРТ - достаточно высокое пространственное разрешение, но его недостаток - относительно низкое временное разрешение. Разработаны и апробированы двухшлемные системы катушек для одновременной регистрации гемодинамического ответа у испытуемых в одной фМРТ установке, обеспечивающие визуализацию мозговой активности в общем физическом пространстве [39; 61].

Современные модели БИК-спектроскопии мобильны и позволяют проводить регистрацию активности корковых структур мозга нескольких субъектов в условиях, близких к естественным [13]. Однако БИК-спектроскопия имеет довольно низкое временное и пространственное разрешение. Кроме того, локализация исследуемых областей ограничена

глубиной проникновения света в ткани мозга (~3 см), что делает невозможным исследование подкорковых структур, обеспечивающих интеграцию мотивационных, подкрепляющих и эмоциогенных систем в процессе социальных взаимодействий.

**Методы анализа нейрофизиологических показателей при гиперсканировании** включают выявление областей мозга, в которых происходят значимые индивидуальные изменения нейрофизиологических сигналов при социальных взаимоотношениях, после чего применяются математические методы для обнаружения их взаимосвязей между испытуемыми. Используются следующие подходы: 1) корреляционный анализ в различных частотных диапазонах [6; 14], компонентный многомерный анализ [21; 51]; 2) оценка мер связанности двух периодических процессов (степень фазовой синхронизации [24], фазовая когерентность и индекс запаздывания фазы [7; 49], когерентность вейвлет-преобразований двух сигналов [56; 71]); 3) меры теории графов (модульность, направленность, сетевые характеристики, отражающие свойства организации межнейронных сетей [25; 59]); 4) оценка причинно-следственных связей (причинность Грейнджера [43; 56]); 5) нелинейные методы анализа синхронизации сигналов [43].

Для проверки достоверности показателей мозговой синхронизации проводится сравнение выявленных феноменов у реально взаимодействующих испытуемых с рандомизированными исходными данными: случайно выбранными парами [66] или с «лжепарными» испытаниями, когда объединяются сигналы мозговой активности на индивидуальных этапах деятельности [8].

Другим методом контроля достоверности синхронизации мозговой активности является декомпозиция (случайные перестановки блоков исходных сигналов), которая позволяет исключить ложные взаимосвязи, вызванные частотными особенностями сигналов. Декомпозиция может быть

применена по отдельности или попарно для синхронно зарегистрированных точек временных рядов [15].

### **Результаты исследований различных типов социальных отношений методами гиперсканирования**

*Совместное внимание* – это когнитивный процесс распознавания характеристик взгляда и жестов, лежащий в основе способности понимать невербальные социальные сигналы и намерения других.

В БИК-спектроскопическом исследовании на модели прямого зрительного контакта продемонстрирована активация и увеличение функциональной межсубъектной связанности в левой лобной и височно-теменной областях коры, которые прилегают к областям Брока и Вернике, отвечающим за восприятие, понимание и воспроизведение речи [30]. Прямой зрительный контакт приводит к активации передней части медиальной префронтальной коры [65], зрительных областей, правой задней верхней височной борозды, дорсомедиальной префронтальной коры, а также правой нижней лобной извилины [36; 62], которая, предположительно, выполняет роль «посредника» между восприятием себя и другого человека [36]. Отмечается правосторонняя асимметрия гемодинамического ответа в процессе совместного внимания в правых областях височно-теменного узла и затылочной части верхней височной борозды [59], а также средней и нижней лобной извилины и предклинья [16].

Продемонстрирована фазовая синхронизация ЭЭГ в альфа-мю диапазоне в процессе совместного внимания на модели прямого зрительного контакта [19] и параллельного зрительного поиска [68]. В периоды совместного внимания происходит снижение активности в альфа-мю диапазоне в левой центропарietальной и затылочной областях [38]. Межсубъектная синхронизация осцилляторной активности мозга у детей школьного возраста при прямом зрительном контакте является предиктором вовлеченности в образовательный процесс и отражает их социальность [20].

### ***Вербальное общение***

Наряду со зрительным контактом вербальное общение является ключевым инструментом социальных взаимодействий и зачастую эти два компонента оказывают взаимное влияние на мозговую активность. Фазовая синхронизация в левой нижней лобной области коры в процессе диалога обнаруживается только при поддержании собеседниками визуального контакта [33], что подчеркивает важность зрительного компонента при вербальной коммуникации. Совместное выполнение вербальных заданий в процессе общения сопровождается синхронным усилением активации в зоне Вернике, а именно в области верхней височной извилины, но не в зоне Брока [29]. Общение в группе сопровождается выраженной синхронной активацией в лобной полюсной области [54].

Согласно результатам МЭГ-ЭЭГ исследования [7], общение между двумя индивидуумами сопровождается фазовой синхронизацией в альфа-диапазоне в левой передней височной и правой центральной теменной областях и синхронизацией в гамма-диапазоне в левом височном и лобном отделах коры. Синхронизация в тета/альфа диапазонах в височной и латеральной теменной областях характерна для синхронизации ритма речи [7; 35]. При смене роли говорящего и слушающего наблюдается усиление 10-Гц активности за несколько секунд до окончания речи собеседника и началом собственной речи, а также совместная активация в диапазоне ~10 и ~20 Гц, которая в области левой центральной борозды выражена слабее у говорящего [37; 45].

### ***Аффективные взаимодействия***

Эмоциональный компонент общения оказывает значительное влияние на желание и готовность к взаимодействию. В исследовании целующихся влюбленных выявлена «гиперсеть» мозга, включающая зоны коры с преобладанием тета или альфа активности, с особой ролью теменных и затылочных областей, которые, согласно мнению авторов, играют роль связующего звена в интеграции активности внутри сети и ее связи с другими [48]. БИК-спектроскопическое исследование кооперации между

романтическими партнерами продемонстрировало увеличение межсубъектной синхронизации в правой верхней лобной доле, характер и направленность которой различались у мужчин и женщин [56]. Показано, что нейрональная активность человека может быть предсказана активностью мозга любовного партнера, передающего эмоциональную информацию, что позволило предположить наличие общего «аффективного пространства» между возлюбленными [9].

Модель «мать-дитя» представляется наиболее эффективной для изучения аффективных взаимодействий, так как мать и ребенок испытывают сильные эмоции даже в отсутствии физических контактов. В МЭГ-исследовании взаимодействий матери и ребенка продемонстрирована синхронизация гамма-активности в верхней височной борозде в процессе эмоционально позитивных взаимодействий [42].

### ***Поведенческая синхронизация***

Наиболее часто изучение социальных взаимоотношений проводится на моделях совместной деятельности, требующих поведенческой синхронизации различной степени сложности: от простых моторных действий [52; 74] до совместного выполнения сложно координированных заданий: игры музыкантов [49] или спонтанной имитации движений рук [23].

При синхронном нажатии на кнопку у испытуемых наблюдается активация в префронтальных отделах [26] и левой средней лобной области коры [31], синхронизация в которой коррелирует со степенью просоциальности субъектов. Координация ритмичных движений кончиками пальцев сопровождается фазовой синхронизацией в бета-диапазоне в фронтальных и центральных областях [52] и синхронизацией в тета- и бета-диапазонах в нижней лобной извилине, передней цингулярной и венстромедиальной префронтальной коре [74]. При переходе от некоординированных к координированным ритмичным действиям обнаруживается синхронизация альфа-мю активности в правой центральной теменной области [24]. Высказано предположение [50], что синхронизация



высокочастотного компонента альфа-мю ритма зависит от типа задания и поразному проявляется в левом и правом полушариях. В левом полушарии верхний мю-диапазон характерен для имитации действий, в то время как синхронизация в правом полушарии отвечает за дискриминацию между двигательной активностью и зрительным восприятием действий партнера и, таким образом, модулирует последующую моторную координацию. При совместной игре на музыкальных инструментах наблюдается увеличение фазовой синхронизации в дельта- и тета-диапазонах [63].

Вопрос об асимметрии нейронального ответа и участия различных ритмов ЭЭГ в поведенческой синхронизации остается открытым. Продемонстрирована билатеральная активация и фазовая синхронизация в тета- и бета-диапазонах в процессе координации движений пальцев рук [52; 74]. В другом исследовании обнаружена выраженная правосторонняя асимметрия синхронизации в высокочастотном мю-диапазоне [24].

Результаты анализа активности мозга в процессе наблюдения за действиями партнера позволили выявить ведущую роль системы зеркальных нейронов и альфа-мю активности в формировании связи между репрезентацией и непосредственно действием, а также в поддержании функции совместного внимания и интеграции информации о собственных действиях и поведении других [23; 53].

***Игровые взаимодействия с принятием совместных решений, включая экономические***

В процессе игровых взаимодействий с принятием решений наблюдается активация медиальной префронтальной и передней цингулярной коры, верхней височной борозды и височно-теменной узла [11; 69; 74]. Увеличение активации височно-теменного узла в процессе игры в карты характерно для субъектов, обманывающих партнеров, а непреднамеренный обман связан с активацией верхней височной борозды [74]. Выявлено, что социальный контекст (кооперация или конкуренция) [3; 13] и знакомство участников игры друг с другом [11] - наиболее важные

факторы, влияющие на синхронизацию мозговой активности. При кооперации происходит активация передней поясной коры и поясной моторной зоны, являющихся частью системы вознаграждения [11]. Продемонстрирована активация дорсальной части передней поясной коры, а также роль цингулярной и парацингулярной зон в модуляции ответа на различный социальный контекст [69].

Показана синхронизация ЭЭГ активности в тета/альфа-диапазонах у людей при кооперации в «Дилемме заключенного» [32] и высокочастотной активности в центральных лобных областях коры в игре «Ультиматум» [73].

***Воздействия внешних физиологических и фармакологических факторов*** позволяют изучать роль различных областей мозга в социальном поведении и нейрохимические механизмы синхронизации активности между несколькими индивидуумами. В ряде работ использовали транскраниальную стимуляцию переменным током (ТСПТ) двух испытуемых. Синфазная ТСПТ моторной коры с частотой 20 Гц приводила к усилению моторной координации на начальных этапах синхронизации, по сравнению с отсутствием эффектов противфазной, фиктивной или со стимуляцией с частотой движений (2 Гц) и альфа-ритма (10 Гц) [52]. ТСПТ в тета-диапазоне правой лобной и теменной областей мозга двух игроков на барабанах не оказывала влияния на эффективность синхронизации движений, а наоборот была связана с большей диадической асинхронностью [67].

Интраназальное введение окситоцина усиливало межмозговую синхронизацию в альфа-диапазоне в затылочных и центральных областях и повышало эффективность моторной координации между субъектами [27; 47], причем этот эффект был более выражен у тех, для кого характерны более высокие значения индекса эмпатии [34].

**Практическая значимость исследований нейрофизиологических механизмов межличностных социальных отношений методами гиперсканирования**

Изучение нейрофизиологических основ кооперативного поведения имеет решающее значение для профессий, в которых сотрудничество является обязательным условием достижения успеха в выполнении поставленных задач. Предложен комбинированный подход к ЭЭГ-гиперсканированию и оценке эффективной межсубъектной связанности с целью выявления «мозговых коррелятов кооперации» между членами профессиональных летных экипажей [70]. Показано, что показатели межмозговой синхронизации у пилотов более информативны для оценки эффективности кооперации, чем их индивидуальные характеристики ЭЭГ.

Гиперсканирование с помощью БИК-спектроскопии симуляционных взаимодействий врачей анестезиологов-реаниматологов в операционной позволило выявить взаимосвязи показателей синхронизации мозговой активности с рабочей нагрузкой и успешностью деятельности [72].

В исследовании с использованием БИК-спектроскопического гиперсканирования в процессе натуралистической учебной деятельности показано, что синхронизация мозговой активности в префронтальной и верхней височной коре между преподавателем и учащимся зависит от контекста образовательного процесса и может быть прогностическим критерием результативности обучения [57]. Показано, что синхронизация альфа-активности ЭЭГ между преподавателем и студентами позволяет предсказать успешность запоминания информации учащимися [19].

Таким образом, понимание нейрофизиологических механизмов социального поведения может способствовать разработке путей повышения эффективности группового обучения и командной деятельности в различных сферах профессиональной деятельности.

Предлагается применение методов гиперсканирования в психотерапии [75] и психиатрии [41; 55], в частности, при изучении механизмов развития аутизма, аффективных состояний, шизофрении. Гиперсканирование может быть использовано при лечении психиатрических нарушений методами

социальной синхронизации поведения, двойной стимуляции мозга, мультиличностной нейрофизиологической обратной связи [55].

### **Заключение**

Динамичное развитие когнитивной нейронауки и социальной психологии привело к необходимости разработки новых методов и технологий для изучения нейробиологических механизмов социального поведения, в основе которых лежит взаимодействие различных структур и сетей мозга, а также других субсистем организма. Выявляемые взаимосвязи между мозговыми сигналами не означает, что между двумя субъектами возникает физический «канал связи», как ошибочно было предположено в первых работах с одновременной регистрацией ЭЭГ. Babiloni и Astolfi [10] считают, что пространственно-временная синхронизация мозговой активности косвенно указывает на цепь когнитивных и эмоциональных событий, начало которой проявляется в изменениях активности определенных областей мозга одного субъекта и продолжается мозговыми процессами у другого. Они полагают, что обнаруживаемые взаимосвязи отражают пространственно-временную карту зон мозга испытуемых, участвующих в решении поставленной социальной задачи конкретного эксперимента [10].

Исследования функциональной межсубъектной связанности активности мозга методами гиперсканирования привели к развитию так называемой «двухличностной» нейробиологии. Полученные результаты демонстрируют одновременное вовлечение и взаимодействие между тремя основными системами мозга при социальных взаимодействиях: 1) системой зеркальных нейронов, которая играет важную роль в задачах, связанных с имитацией и координацией действий; 2) ментальной системой, обеспечивающей когнитивные процессы, необходимые для формирования умозаключений о себе и других, а также их намерениях; и 3) системой оценки вознаграждений [17; 28; 60; 64].

Для более полного изучения организации и функционирования мозговых сетей социальных взаимодействий потребуются дальнейшее развитие методов гиперсканирования, разработка более экологически обоснованных экспериментальных задач с оценкой показателей коллективного поведения и большая направленность исследований на их возникновение, развитие и пластичность.

Во многих исследованиях социальных взаимодействий авторы делают акцент на какой-либо одной стороне когнитивных процессов. Согласно системному подходу школы П.К. Анохина [1; 2], взаимодействующих субъектов можно рассматривать как компоненты внутри системы, иерархически выше организованной, как для отдельного индивида в достижении им личных результатов в составе группы, так и для достижения интегрального результата группы в целом. С точки зрения теории функциональных систем при целенаправленной деятельности личности в социуме должны происходить: реорганизация процессов афферентного синтеза за счет необходимости оценки значимых социальных обстановочных и пусковых стимулов; извлечение из памяти более сложных способов и программ удовлетворения собственных мотиваций и достижения результатов в присутствии, с участием или даже при противодействии других субъектов. В соответствии с выбранной поведенческой программой взаимодействия должен перестраиваться акцептор ожидаемых результатов действий с учетом ценностной оценки, как индивидуальной, так и внешней со стороны социального окружения.

### **Финансирование**

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №19-115-50143).

### **Литература**

1. Александров Ю.И. Макроструктура деятельности и иерархия функциональных систем // Психологический Журнал. 1995. Т.16. № 1. С. 26–30.

2. *Анохин П.К.* Узловые вопросы теории функциональной системы // П.К. Анохин, Изд-во «Наука». 1980. С. 196.
3. *Апанович В.В., Безденежных Б.Н., Знаков В.В., Самс М., Яскелайнен И., Александров Ю.И.* Различия мозгового обеспечения индивидуального, кооперативного и конкурентного поведения у субъектов с аналитическим и холистическим когнитивными стилями // Экспериментальная психология. 2016. Т. 9. №2. С. 5–22. doi:10.17759/exppsy.2016090202 doi:10.17759/exppsy.2016090202
4. *Журавлев А.Л., Юревич А.В.* Вместо введения: основные типы тенденций развития психологии // Новые тенденции и перспективы психологической науки / Отв. ред. А.Л. Журавлев, А.В. Юревич. М.: ИП РАН. 2019. С. 5–8.
5. *Муртазина Е.П., Матюлько И.С., Журавлев Б.В.* Соматовегетативные компоненты социальных взаимодействий (обзор) // Журнал Медико-Биологических Исследований. 2019. Т. 7. №3.С. 349–362. doi:10.17238/issn2542-1298.2019.7.3.349
6. *Abe M.O., Koike T., Okazaki S., Sugawara S.K., Takahashi K., Watanabe K., Sadato N.* Neural correlates of online cooperation during joint force production // NeuroImage. 2019. Vol. 191. P. 150–161. doi:10.1016/j.neuroimage.2019.02.003
7. *Ahn S., Cho H., Kwon M., Kim K., Kwon H., Kim B.S., Chang W.S., Chang W.J., Jun S.Ch.* Interbrain phase synchronization during turn-taking verbal interaction—a hyperscanning study using simultaneous EEG/MEG // Human Brain Mapping. 2018. Vol. 39. № 1. P. 171–188. doi:10.1002/hbm.23834
8. *Allsop J.S., Vaitkus T., Marie D., Miles L.* Coordination and collective performance: cooperative goals boost interpersonal synchrony and task outcomes // Frontiers in Psychology. 2016. Vol. 7. P. 1462. doi:10.3389/fpsyg.2016.01462
9. *Anders S., Heinzle J., Weiskopf N., Ethofer T., John-Dylan Haynes J.-D.* Flow of affective information between communicating brains // NeuroImage. 2011. Vol. 54. № 1. P. 439–446. doi:10.1016/j.neuroimage.2010.07.004

10. *Babiloni F., Astolfi L.* Social neuroscience and hyperscanning techniques: past, present and future // *Neuroscience and biobehavioral reviews*. 2014. Vol. 0. P. 76–93. doi:10.1016/j.neubiorev.2012.07.006
11. *Babiloni F., Astolfi L., Cincotti F., Mattia D., Tocci A., Tarantino A., Marciani Mg., Salinari S., Gao S., Colosimo A., De Vico Fallani F.* Cortical activity and connectivity of human brain during the Prisoner's Dilemma: an EEG hyperscanning study // 2007. P. 4953–4956. doi:10.1109/IEMBS.2007.4353452
12. *Balconi M., Vanutelli M.E.* Brains in competition: improved cognitive performance and inter-brain coupling by hyperscanning paradigm with functional near-infrared spectroscopy // *Frontiers in Behavioral Neuroscience*. 2017. Vol. 11. P. 163. doi:10.3389/fnbeh.2017.00163
13. *Balconi M., Vanutelli M.E.* Cooperation and competition with hyperscanning methods: review and future application to emotion domain // *Frontiers in Computational Neuroscience*. 2017. Vol. 11. P. 86. doi:10.3389/fncom.2017.00086
14. *Bevilacqua D., Davidesco I., Wan L., Chaloner K., Rowland J., Ding M., Poeppel D., Dikker S.* Brain-to-Brain synchrony and learning outcomes vary by student–teacher dynamics: evidence from a real-world classroom electroencephalography study // *Journal of Cognitive Neuroscience*. 2018. Vol. 31. № 3. P. 401–411. doi:10.1162/jocn\_a\_01274
15. *Bilek E., Ruf M., Schäfer A., Akdeniz C., Calhoun V.D., Schmahl C., Demanuele C., Tost H., Kirsch P., Meyer-Lindenberg A.* Information flow between interacting human brains: Identification, validation, and relationship to social expertise // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2015a. Vol. 112. № 16. P. 5207–5212. doi:10.1073/pnas.1421831112
16. *Caruana N., Brock J., Woolgar A.* A frontotemporoparietal network common to initiating and responding to joint attention bids // *NeuroImage*. 2015. Vol. 108. P. 34–46. doi:10.1016/j.neuroimage.2014.12.041
17. *Ciaramidaro A., Becchio C., Colle L., Bara B.G., Walter H.* Do you mean me? Communicative intentions recruit the mirror and the mentalizing system //

- Social Cognitive and Affective Neuroscience. 2014. Vol. 9. № 7. P. 909–916.  
doi:10.1093/scan/nst062
18. *Czeszumski A., Eustergerling S., Lang A., Menrath D., Gerstenberger M., Schuberth S., Schreiber F., Rendon Z.Z., König P.* Hyperscanning: a valid method to study neural inter-brain underpinnings of social interaction // *Frontiers in Human Neuroscience*. 2020. Vol. 14. P. 39. doi:10.3389/fnhum.2020.00039
19. *Davidesco I., Laurent E., Valk H., West T., Dikker S., Milne C., Poeppel D.* Brain-to-brain synchrony between students and teachers predicts learning outcomes // *bioRxiv*. 2019. P. 644047. doi:10.1101/644047
20. *Dikker S., Wan L., Davidesco I., Kaggen L., Oostrik M., James McClintock J., Rowland J., Michalareas G., Van Bavel J.J., Ding M., Poeppel D.* Brain-to-brain synchrony tracks real-world dynamic group interactions in the classroom // *Current Biology*. 2017. Vol. 27. № 9. P. 1375–1380. doi:10.1016/j.cub.2017.04.002
21. *Dmochowski J.P., Sajda P., Dias J., Parra L.C.* Correlated components of ongoing eeg point to emotionally laden attention – a possible marker of engagement? // *Frontiers in Human Neuroscience*. 2012. Vol. 6. P. 112. doi:10.3389/fnhum.2012.00112
22. *Duane T.D., Behrendt T.* Extrasensory electroencephalographic induction between identical twins // *Science (New York, N.Y.)*. 1965. Vol. 150. № 3694. P. 367. doi:10.1126/science.150.3694.367
23. *Dumas G., Martinerie J., Soussignan R., Nadel J.* Does the brain know who is at the origin of what in an imitative interaction? // *Frontiers in Human Neuroscience*. 2012a. Vol. 6. P. 128. doi:10.3389/fnhum.2012.00128
24. *Dumas G., Nadel J., Soussignan R., Martinerie J., Garnero L.* Inter-brain synchronization during social interaction // *PLOS ONE*. 2010. Vol. 5. № 8. P. e12166. doi:10.1371/journal.pone.0012166
25. *Fallani F.D.V., Nicosia V., Sinatra R., Astolfi L., Cincotti F., Mattia D., Wilke C., Doud A., Latora V., He B., Babiloni F.* Defecting or not defecting: how to



- “read” human behavior during cooperative games by EEG measurements // PLOS ONE. 2010. Vol. 5. № 12. P. e14187. doi:10.1371/journal.pone.0014187
26. *Funane T., Kiguchi M., Atsumori H., Sato H., Kubota K., Koizumi H.* Synchronous activity of two people’s prefrontal cortices during a cooperative task measured by simultaneous near-infrared spectroscopy // *Journal of Biomedical Optics*. 2011. Vol. 16. № 7. P. 077011. doi:10.1117/1.3602853
27. *Gebauer L., Witek M.G., Hansen N.C., Thomas J., Konvalink, I., Vuust P.* Oxytocin improves synchronisation in leader-follower interaction // *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6. № 1. P. 38416. doi:10.1038/srep38416
28. *Hari R., Kujala M.* Brain basis of human social interaction: from concepts to brain imaging. // *Physiological reviews*. 2009. Vol. 89. P. 453–79. doi:10.1152/physrev.00041.2007
29. *Hirsch J., Adam Noah J., Zhang X., Dravida S., Ono Y.* A cross-brain neural mechanism for human-to-human verbal communication // *Social Cognitive and Affective Neuroscience*. 2018. Vol. 13. № 9. P. 907–920. doi:10.1093/scan/nsy070
30. *Hirsch J., Zhang X., Noah J.A., Ono Y.* Frontal temporal and parietal systems synchronize within and across brains during live eye-to-eye contact // *NeuroImage*. 2017. Vol. 157. P. 314–330. doi:10.1016/j.neuroimage.2017.06.018
31. *Hu Y., Hu Y., Li X., Pan Y., Cheng X.* Brain-to-brain synchronization across two persons predicts mutual prosociality // *Social Cognitive and Affective Neuroscience*. 2017. Vol. 12. № 12. P. 1835–1844. doi:10.1093/scan/nsx118
32. *Hu Y., Pan Y., Shi X., Cai Q., Li X., Cheng X.* Inter-brain synchrony and cooperation context in interactive decision making // *Biological Psychology*. 2018. Vol. 133. P. 54–62. doi:10.1016/j.biopsycho.2017.12.005
33. *Jiang J., Dai B., Peng D., Zhu C., Liu L., Lu C.* Neural Synchronization during Face-to-Face Communication // *Journal of Neuroscience*. 2012. Vol. 32. № 45. P. 16064–16069. doi:10.1016/j.neuroimage.2017.06.024

34. *Josef L., Goldstein P., Maysless N., Ayalon L., Shamay-Tsoory S.G.* The oxytocinergic system mediates synchronized interpersonal movement during dance // *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9. № 1. P. 1894. doi:10.1038/s41598-018-37141-1
35. *Kawasaki M., Yamada Y., Ushiku Y., Miyauchi E., Yamaguchi Y.* Inter-brain synchronization during coordination of speech rhythm in human-to-human social interaction // *Scientific Reports*. 2013. Vol. 3. № 1. P. 1–8. doi:10.1038/srep01692
36. *Koike T., Tanabe H.C., Okazaki S., Nakagawa E., Sasaki A.T., Shimada K., Sugawara S.K., Takahashi H.K., Yoshihara K., Bosch-Bayard J., Sadato N.* Neural substrates of shared attention as social memory: A hyperscanning functional magnetic resonance imaging study // *NeuroImage*. 2016. Vol. 125. P. 401–412. doi:10.1016/j.neuroimage.2015.09.076
37. *Kuhlen A.K., Allefeld C., Haynes J.-D.* Content-specific coordination of listeners' to speakers' EEG during communication // *Frontiers in Human Neuroscience*. 2012. Vol. 6. P. 266. doi:10.3389/fnhum.2012.00266
38. *Lachat F., Hügeville L., Lemarechal J.-D., Conty L., George N.* Oscillatory brain correlates of live joint attention: a dual-EEG study // *Frontiers in Human Neuroscience*. 2012. Vol. 6. P. 156. doi:10.3389/fnhum.2012.00156
39. *Lee R.F., Dai W., Jones J.* Decoupled circular-polarized dual-head volume coil pair for studying two interacting human brains with dyadic fMRI // *Magnetic Resonance in Medicine*. 2012. Vol. 68. № 4. P. 1087–1096. doi:10.1002/mrm.23313
40. *Lee S., Cho H., Kim K., Jun S.C.* Simultaneous EEG acquisition system for multiple users: development and related issues // *Sensors*. 2019. Vol. 19. № 20. P. 4592. doi:10.3390/s19204592
41. *Leong V., Schilbach L.* The promise of two-person neuroscience for developmental psychiatry: using interaction-based sociometrics to identify disorders of social interaction // *The British Journal of Psychiatry*. 2019. Vol. 215. № 5. P. 636–638. doi:10.1192/bjp.2019.73.

42. *Levy J., Goldstein A., Feldman R.* Perception of social synchrony induces mother–child gamma coupling in the social brain // *Social Cognitive and Affective Neuroscience*. 2017. Vol. 12. № 7. P. 1036–1046. doi:10.1093/scan/nsx032
43. *Li T., Li G., Xue T., Zhang J.* Analyzing brain connectivity in the mutual regulation of emotion–movement using bidirectional granger causality // *Frontiers in Neuroscience*. 2020. Vol. 14. P. 369. doi:10.3389/fnins.2020.00369
44. *Liu D., Liu S., Liu X., Zhang C., Li A., Jin C., Chen Y., Wang H., Zhang X.* Interactive brain activity: review and progress on EEG-based hyperscanning in social interactions // *Frontiers in Psychology*. 2018a. Vol. 9. P. 1862. doi:10.3389/fpsyg.2018.01862
45. *Mandel A., Bourguignon M., Parkkonen L., Hari R.* Sensorimotor activation related to speaker vs. listener role during natural conversation // *Neuroscience Letters*. 2016. Vol. 614. P. 99–104. doi:10.1016/j.neulet.2015.12.054
46. *Montague P.R., Berns G.S., Cohen J.D., King R.D., Apple N., Fisher R.E.* Hyperscanning: simultaneous fMRI during linked social interactions // *NeuroImage*. 2002. Vol. 16. № 4. P. 1159–1164. doi:10.1006/nimg.2002.1150
47. *Mu Y., Guo C., Han S.* Oxytocin enhances inter-brain synchrony during social coordination in male adults // *Social Cognitive and Affective Neuroscience*. 2016. Vol. 11. № 12. P. 1882–1893. doi:10.1093/scan/nsw106
48. *Müller V., Lindenberger U.* Hyper-brain networks support romantic kissing in humans // *PLoS ONE*. 2014. Vol. 9. № 11. doi:10.1371/journal.pone.0112080.
49. *Müller V., Sängler J., Lindenberger U.* Intra- and inter-brain synchronization during musical improvisation on the guitar // *PloS One*. 2013. Vol. 8. № 9. P. e73852. doi:10.1093/scan/nsw106
50. *Naeem M., Prasad G., Watson D.R., Kelso J.A.S.* Functional dissociation of brain rhythms in social coordination // *Clinical Neurophysiology*. 2012b. Vol. 123. № 9. P. 1789–1797. doi:10.1016/j.clinph.2012.02.065

51. *Nastase S.A., Gazzola V., Hasson U., Keysers C.* Measuring shared responses across subjects using intersubject correlation // *Social Cognitive and Affective Neuroscience*. 2019. Vol. 14. № 6. P. 667–685. doi:10.1093/scan/nsz037
52. *Novembre G., Knoblich G., Dunne L., Keller P.E.* Interpersonal synchrony enhanced through 20 Hz phase-coupled dual brain stimulation // *Social Cognitive and Affective Neuroscience*. 2017. Vol. 12. № 4. P. 662–670. doi:10.1093/scan/nsw172
53. *Novembre G., Sammler D., Keller P.E.* Neural alpha oscillations index the balance between self-other integration and segregation in real-time joint action // *Neuropsychologia*. 2016. Vol. 89. P. 414–425. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2016.07.027
54. *Nozawa T., Sasaki Y., Sakaki K., Yokoyama R., Kawashima R.* Interpersonal frontopolar neural synchronization in group communication: An exploration toward fNIRS hyperscanning of natural interactions // *NeuroImage*. 2016. Vol. 133. P. 484–497. doi:10.1016/j.neuroimage.2016.03.059
55. *Pan Y., Cheng X.* Two-person approaches to studying social interaction in psychiatry: uses and clinical relevance // *Frontiers in Psychiatry*. 2020. Vol. 11. P. 301. doi:10.3389/fpsy.2020.00301
56. *Pan Y., Cheng X., Zhang Z., Li X., Hu Y.* Cooperation in lovers: An fNIRS-based hyperscanning study. // *Human Brain Mapping*. 2017. Vol. 38. № 2. P. 831–841. doi:10.1002/hbm.23421
57. *Pan Y., Dikker S., Goldstein P., Zhu Y., Yang C., Hu Y.* Instructor-learner brain coupling discriminates between instructional approaches and predicts learning // *NeuroImage*. 2020. Vol. 211. P. 116657. doi:10.1016/j.neuroimage.2020.116657
58. *Poulsen A.T., Kamronn S., Dmochowski J., Parra L.C., Hansen L.K.* EEG in the classroom: synchronised neural recordings during video presentation // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. № 1. P. 43916. doi:10.1038/srep43916
59. *Redcay E., Dodell-Feder D., Pearrow M.J., Mavros P.L., Kleiner M., Gabrieli J.D.E., Saxe R.* Live face-to-face interaction during fMRI: a new tool for social

- cognitive neuroscience // *NeuroImage*. 2010. Vol. 50. № 4. P. 1639–1647. doi:10.1016/j.neuroimage.2010.01.052
60. *Redcay E., Schilbach L.* Using second-person neuroscience to elucidate the mechanisms of social interaction // *Nature Reviews Neuroscience*. 2019. Vol. 20. № 8. P. 495–505. doi:10.1038/s41583-019-0179-4
61. *Renvall V., Kauramäki J., Malinen S., Hari R., Nummenmaa L.* Imaging real-time tactile interaction with two-person dual-coil fMRI // *Frontiers in Psychiatry*. 2020. Vol. 11. P. 279. doi:10.3389/fpsy.2020.00279
62. *Saito D.N., Tanabe H.C., Izuma K., Hayashi M.J., Morito Y., Komeda H., Uchiyama H., Kosaka H., Okazawa H., Fujibayashi Y., Sadato N.* “Stay tuned”: inter-individual neural synchronization during mutual gaze and joint attention // *Frontiers in Integrative Neuroscience*. 2010. Vol. 4. P. 127. doi:10.3389/fnint.2010.00127
63. *Sänger J., Müller V., Lindenberger U.* Intra- and interbrain synchronization and network properties when playing guitar in duets // *Frontiers in Human Neuroscience*. 2012. Vol. 6. P. 312. doi:10.3389/fnhum.2012.00312
64. *Schilbach L., Timmermans B., Reddy V., Costall A., Bente G., Schlicht T., Vogeley K.* Toward a second-person neuroscience // *Behavioral and Brain Sciences*. 2013. Vol. 36. № 4. P. 393–414. doi:10.1017/S0140525X12000660
65. *Schilbach L., Wilms M., Eickhoff S.B., Romanzetti S., Tepest R., Bente G., Shah N.J., Fink G.R., Vogeley K.* Minds made for sharing: initiating joint attention recruits reward-related neurocircuitry // *Journal of Cognitive Neuroscience*. 2010. Vol. 22. № 12. P. 2702–2715. doi:10.1162/jocn.2009.21401
66. *Stolk A., Noordzij M.L., Verhagen L., Volman I., Schoffelen J.-M., Oostenveld R., Hagoort P., Toni I.* Cerebral coherence between communicators marks the emergence of meaning // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2014. Vol. 111. № 51. P. 18183–18188. doi:10.1073/pnas.1414886111
67. *Szymanski C., Müller V., Brick T.R., von Oertzen T., Lindenberger U.* Hypertranscranial alternating current stimulation: experimental manipulation of inter-

- brain synchrony // *Frontiers in Human Neuroscience*. 2017. Vol. 11. P. 539.  
doi:10.3389/fnhum.2017.00539
68. *Szymanski C., Pesquita A., Brennan A.A., Perdikis D., Enns J.T., Brick T.R., Müller V., Lindenberger U.* Teams on the same wavelength perform better: Inter-brain phase synchronization constitutes a neural substrate for social facilitation // *NeuroImage*. 2017. Vol. 152. P. 425–436.  
doi:10.1016/j.neuroimage.2017.03.013
69. *Tomlin D., Kayali M.A., King-Casas B., Anen C., Camerer C.F., Quartz S.R., Montague P.R.* Agent-specific responses in the cingulate cortex during economic exchanges // *Science*. 2006. Vol. 312. № 5776. P. 1047–1050.  
doi:10.1126/science.1125596
70. *Toppi J., Borghini G., Petti M., He E.J., Giusti V.D., He B., Astolfi L., Babiloni F.* Investigating cooperative behavior in ecological settings: an EEG hyperscanning study // *PLOS ONE*. 2016. Vol. 11. № 4. P. e0154236.  
doi:10.1371/journal.pone.0154236
71. *Wang C., Zhang T., Shan Z., Liu J., Yuan D., Li X.* Dynamic interpersonal neural synchronization underlying pain-induced cooperation in females // *Human Brain Mapping*. 2019. Vol. 40. № 11. P. 3222–3232.  
doi:10.1002/hbm.24592
72. *Xu J., Slagle J.M., Banerjee A., Bracken B., Weinger M.B.* Use of a portable functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) system to examine team experience during crisis event management in clinical simulations // *Frontiers in Human Neuroscience*. 2019. Vol. 13. P. 85. doi:10.3389/fnhum.2019.00085
73. *Yun K., Chung D., Jeong J.* Emotional interactions in human decision making using EEG hyperscanning // *International Conference of Cognitive Science*. 2008. P. 4.
74. *Zhang M., Liu T., Pelowski M., Yu D.* Gender difference in spontaneous deception: A hyperscanning study using functional near-infrared spectroscopy // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. № 1. P. 7508. doi:10.1038/s41598-017-06764-

75. Zhang Y., Meng T., Hou Y., Pan Y., Hu Y. Interpersonal brain synchronization associated with working alliance during psychological counseling // *Psychiatry Research: Neuroimaging*. 2018. V. 282. P. 103–109. doi:10.1016/j.psychresns.2018.09.007
76. Zhdanov A., Nurminen J., Baess P., Hirvenkari L., Jousmäki V., Mäkelä J.P., Mandel A., Meronen L., Hari R., Parkkonen L. An internet-based real-time audiovisual link for dual MEG recordings // *PLOS ONE*. 2015. Vol. 10. № 6. P. e0128485. doi:10.1371/journal.pone.0128485
77. Zhou G., Bourguignon M., Parkkonen L., Hari R. Neural signatures of hand kinematics in leaders vs. followers: A dual-MEG study // *NeuroImage*. 2016. Vol. 125. P. 731–738. doi:10.1016/j.neuroimage.2015.11.002

### **The Review of the Hyperscanning Studies on Inter-subject Synchronization of Brain Responses during Social Interaction**

***Murtazina E.P.,***

P.K. Anokhin Institute of Normal Physiology, Moscow, Russia,  
e.murtazina@nphys.ru

***Matiulko I.S.,***

P.K. Anokhin Institute of Normal Physiology, Moscow, Russia,  
irinamatulko@gmail.com

The neurophysiological mechanisms underlying social behavior are still poorly understood. An increasing number of international studies uses hyperscanning for simultaneous recording of brain activation from several individuals during social interaction. Despite the outstanding school of Russian social psychology, the number of studies investigating the neurophysiological basis of social behavior in humans is still limited in the Russian literature. The goal of the present work was to review the studies which use hyperscanning to investigate inter-brain synchronization during social interactions. The paper discusses methods for recording and analysis of multi-subject data representing the changes in brain

activity, existing experimental and naturalistic models, the results of the studies, and applied and fundamental aspects of the hyperscanning implementation. Introduction of the methods which allow for a better understanding of physiological mechanisms of social interactions may contribute to the development of innovative approaches to improving educational process, teamwork in various professional areas, social welfare, and psychosomatic health of people.

**Keywords:** social interaction, hyperscanning, synchronous brain activity, electroencephalography, magnetoencephalography, functional near-infrared spectroscopy, functional magnetic resonance imaging.

### **Funding**

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant № 19-115-50143).

*Murtazina Elena Pavlovna*, Ph.D. in Medicine, Leading Research Associate, P.K. Anokhin Institute of Normal Physiology, Moscow, Russia. E-mail: [e.murtazina@nphys.ru](mailto:e.murtazina@nphys.ru)

*Matiulko Irina Sergeevna*, MSc. in Psychology, Junior Research Associate, P.K. Anokhin Institute of Normal Physiology, Moscow, Russia. E-mail: [irinamatulko@gmail.com](mailto:irinamatulko@gmail.com)

### **References**

1. Alexandrov Yu.I. Makrostruktura deyatel'nosti I ierarhiya funktsional'nyh system [Macrostructure of activity and hierarchy of functional systems]. *Psichologicheskij Zhurnal*. 1995. Vol. 16. № 1. pp. 26–30. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Anohin P.K. Uzlovye voprosy teorii funktsional'noj sistemy [Key questions of the theory of functional systems]. P.K. Anohin, Izd-vo «Nauka». 1980. 196 P. (In Russ.).
3. Apanovich V.V., Bezdenezhnyh B.N., Znakov V.V., Sams M., Yaaskelajnen I., Aleksandrov Yu.I. Razlichiya mozgovogo obespecheniya individual'nogo, kooperativnogo I konkurentnogo povedeniya u sub"ektov s analiticheskim i



- holisticheskim kognitivnymi stilyami [Differences in the brain supply of individual, cooperative and competitive behavior in subjects with analytical and holistic cognitive styles]. Eksperimental'naya psihologiya. 2016. Vol. 9. № 2. pp. 5–22. doi:10.17759/exppsy.2016090202 doi:10.17759/exppsy.2016090202 (In Russ., abstr. in Engl.)
4. Zhuravlev A.L., Yurevich A.V. Vmesto vvedeniya: osnovnye tipy tendencij razvitiya psihologii [Instead of an introduction: the main types of trends in the development of psychology]. Novye tendencii I perspektivy psihologicheskoy nauki / Otv. red. A.L. Zhuravlev, A.V. Yurevich. M.: IP RAN. 2019. pp. 5–8. (In Russ.).
  5. Murtazina E.P., Matyul'ko I.S., Zhuravlev B.V. Somatovegetativnye komponenty social'nyh vzaimodejstvij (obzor) [Somato-vegetative components of social interactions (review)]. Zhurnal Mediko-Biologicheskikh Issledovanij. 2019. Vol. 7. № 3. pp. 349–362. doi:10.17238/issn2542-1298.2019.7.3.349. (In Russ., abstr. in Engl.)
  6. Abe M.O., Koike T., Okazaki S., Sugawara S.K., Takahashi K., Watanabe K., Sadato N. Neural correlates of online cooperation during joint force production. *NeuroImage*. 2019. Vol. 191. pp. 150–161. doi:10.1016/j.neuroimage.2019.02.003
  7. Ahn S., Cho H., Kwon M., Kim K., Kwon H., Kim B.S., Chang W.S., Chang W.J., Jun S.Ch. Interbrain phase synchronization during turn-taking verbal interaction—a hyperscanning study using simultaneous EEG/MEG. *Human Brain Mapping*. 2018. Vol. 39. № 1. pp. 171–188. doi:10.1002/hbm.23834
  8. Allsop J.S., Vaitkus T., Marie D., Miles L. Coordination and collective performance: cooperative goals boost interpersonal synchrony and task outcomes. *Frontiers in Psychology*. 2016. Vol. 7. pp. 1462. doi:10.3389/fpsyg.2016.01462
  9. Anders S., Heinzle J., Weiskopf N., Ethofer T., John-Dylan Haynes J.-D. Flow of affective information between communicating brains. *NeuroImage*. 2011. Vol. 54. № 1. pp. 439–446. doi:10.1016/j.neuroimage.2010.07.004

10. Babiloni F., Astolfi L. Social neuroscience and hyperscanning techniques: past, present and future. *Neuroscience and biobehavioral reviews*. 2014. Vol. 0. pp. 76–93. doi:10.1016/j.neubiorev.2012.07.006
11. Babiloni F., Astolfi L., Cincotti F., Mattia D., Tocci A., Tarantino A., Marciani M., Salinari S., Gao S., Colosimo A., De Vico Fallani F. Cortical activity and connectivity of human brain during the prisoner's dilemma: an EEG hyperscanning study. 2007. pp. 4953–4956. doi:10.1109/IEMBS.2007.4353452
12. Balconi M., Vanutelli M.E. Brains in competition: improved cognitive performance and inter-brain coupling by hyperscanning paradigm with functional near-infrared spectroscopy. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*. 2017. Vol. 11. pp. 163. doi:10.3389/fnbeh.2017.00163
13. Balconi M., Vanutelli M.E. Cooperation and competition with hyperscanning methods: review and future application to emotion domain. *Frontiers in Computational Neuroscience*. 2017. Vol. 11. pp. 86. doi:10.3389/fncom.2017.00086
14. Bevilacqua D., Davidesco I., Wan L., Chaloner K., Rowland J., Ding M., Poeppel D., Dikker S. Brain-to-brain synchrony and learning outcomes vary by student–teacher dynamics: evidence from a real-world classroom electroencephalography study. *Journal of Cognitive Neuroscience*. 2018. Vol. 31. № 3. pp. 401–411. doi:10.1162/jocn\_a\_01274
15. Bilek E., Ruf M., Schäfer A., Akdeniz C., Calhoun V.D., Schmahl C., Demanuele C., Tost H., Kirsch P., Meyer-Lindenberg A. Information flow between interacting human brains: Identification, validation, and relationship to social expertise. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2015a. Vol. 112. № 16. pp. 5207–5212. doi:10.1073/pnas.1421831112
16. Caruana N., Brock J., Woolgar A. A frontotemporoparietal network common to initiating and responding to joint attention bids. *NeuroImage*. 2015. Vol. 108. pp. 34–46. doi:10.1016/j.neuroimage.2014.12.041
17. Ciaramidaro A., Becchio C., Colle L., Bara B.G., Walter H. Do you mean me? Communicative intentions recruit the mirror and the mentalizing system. *Social*

- Cognitive and Affective Neuroscience. 2014. Vol. 9. № 7. pp. 909–916.  
doi:10.1093/scan/nst062
- 18.Czeszumski A., Eustergerling S., Lang A., Menrath D., Gerstenberger M., Schuberth S., Schreiber F., Rendon Z.Z., König P. Hyperscanning: A Valid method to study neural inter-brain underpinnings of social interaction. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2020. Vol. 14. pp. 39. doi:10.3389/fnhum.2020.00039
- 19.Davidesco I., Laurent E., Valk H., West T., Dikker S., Milne C., Poeppel, D. Brain-to-brain synchrony between students and teachers predicts learning outcomes. *bioRxiv*. 2019. P. 644047. doi:10.1101/644047
- 20.Dikker S., Wan L., Davidesco I., Kaggen L., Oostrik M., James McClintock J., Rowland J., Michalareas G., Van Bavel J.J., Ding M., Poeppel D. Brain-to-brain synchrony tracks real-world dynamic group interactions in the classroom. *Current Biology*. 2017. Vol. 27. № 9. pp. 1375–1380. doi:10.1016/j.cub.2017.04.002
- 21.Dmochowski J.P., Sajda P., Dias J., Parra L.C. Correlated components of ongoing EEG point to emotionally laden attention – a possible marker of engagement? *Frontiers in Human Neuroscience*. 2012. Vol. 6. pp. 112. doi:10.3389/fnhum.2012.00112
- 22.Duane T.D., Behrendt T. Extrasensory electroencephalographic induction between identical twins. *Science (New York, N.Y.)*. 1965. Vol. 150. № 3694. P. 367. doi:10.1126/science.150.3694.367
- 23.Dumas G., Martinerie J., Soussignan R., Nadel J. Does the brain know who is at the origin of what in an imitative interaction? *Frontiers in Human Neuroscience*. 2012a. Vol. 6. P. 128. doi:10.3389/fnhum.2012.00128
- 24.Dumas G., Nadel J., Soussignan R., Martinerie J., Garnero L. Inter-brain synchronization during social interaction. *PLOS ONE*. 2010. Vol. 5. № 8. P. e12166. doi:10.1371/journal.pone.0012166
- 25.Fallani F.D.V., Nicosia V., Sinatra R., Astolfi L., Cincotti F., Mattia D., Wilke C., Doud A., Latora V., HeB., Babiloni F. Defecting or not defecting: how to

- “read” human behavior during cooperative games by EEG measurements. PLOS ONE. 2010. Vol. 5. № 12. P. e14187. doi:10.1371/journal.pone.0014187
26. Funane T., Kiguchi M., Atsumori H., Sato H., Kubota K., Koizumi H. Synchronous activity of two people’s prefrontal cortices during a cooperative task measured by simultaneous near-infrared spectroscopy. Journal of Biomedical Optics. 2011. Vol. 16. № 7. P. 077011. doi:10.1117/1.3602853
27. Gebauer L., Witek M.G., Hansen N.C., Thomas J., Konvalink, I., Vuust P. Oxytocin improves synchronisation in leader-follower interaction. Scientific Reports. 2016. Vol. 6. № 1. P. 38416. doi:10.1038/srep38416
28. Hari R., Kujala M. Brain basis of human social interaction: from concepts to brain imaging. Physiological reviews. 2009. Vol. 89. pp. 453–79. doi:10.1152/physrev.00041.2007
29. Hirsch J., Adam Noah J., Zhang X., Dravida S., Ono Y. A cross-brain neural mechanism for human-to-human verbal communication. Social Cognitive and Affective Neuroscience. 2018. Vol. 13. № 9. pp. 907–920. doi:10.1093/scan/nsy070
30. Hirsch J., Zhang X., Noah J.A., Ono Y. Frontal temporal and parietal systems synchronize within and across brains during live eye-to-eye contact. NeuroImage. 2017. Vol. 157. pp. 314–330. doi:10.1016/j.neuroimage.2017.06.018
31. Hu Y., Hu Y., Li X., Pan Y., Cheng X. Brain-to-brain synchronization across two persons predicts mutual prosociality. Social Cognitive and Affective Neuroscience. 2017. Vol. 12. № 12. pp. 1835–1844. doi:10.1093/scan/nsx118
32. Hu Y., Pan Y., Shi X., Cai Q., Li X., Cheng X. Inter-brain synchrony and cooperation context in interactive decision making. Biological Psychology. 2018. Vol. 133. pp. 54–62. doi:10.1016/j.biopsycho.2017.12.005
33. Jiang J., Dai B., Peng D., Zhu C., Liu L., Lu C. Neural Synchronization during Face-to-Face Communication. Journal of Neuroscience. 2012. Vol. 32. № 45. pp. 16064–16069. doi:10.1016/j.neuroimage.2017.06.024

34. Josef L., Goldstein P., Maysless N., Ayalon L., Shamay-Tsoory S.G. The oxytocinergic system mediates synchronized interpersonal movement during dance. *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9. № 1. pp. 1894. doi:10.1038/s41598-018-37141-1
35. Kawasaki M., Yamada Y., Ushiku Y., Miyauchi E., Yamaguchi Y. Inter-brain synchronization during coordination of speech rhythm in human-to-human social interaction. *Scientific Reports*. 2013. Vol. 3. № 1. pp. 1–8. doi:10.1038/srep01692
36. Koike T., Tanabe H.C., Okazaki S., Nakagawa E., Sasaki A.T., Shimada K., Sugawara S.K., Takahashi H.K., Yoshihara K., Bosch-Bayard J., Sadato N. Neural substrates of shared attention as social memory: a hyperscanning functional magnetic resonance imaging study. *NeuroImage*. 2016. Vol. 125. pp. 401–412. doi:10.1016/j.neuroimage.2015.09.076
37. Kuhlen A.K., Allefeld C., Haynes J.-D. Content-specific coordination of listeners' to speakers' EEG during communication. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2012. Vol. 6. P. 266. doi:10.3389/fnhum.2012.00266
38. Lachat F., Hügeville L., Lemarechal J.-D., Conty L., George N. Oscillatory brain correlates of live joint attention: a dual-EEG Study. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2012. Vol. 6. P. 156. doi:10.3389/fnhum.2012.00156
39. Lee R.F., Dai W., Jones J. Decoupled circular-polarized dual-head volume coil pair for studying two interacting human brains with dyadic fMRI. *Magnetic Resonance in Medicine*. 2012. Vol. 68. № 4. pp. 1087–1096. doi:10.1002/mrm.23313
40. Lee S., Cho H., Kim K., Jun S.C. Simultaneous EEG acquisition system for multiple users: development and related issues. *Sensors*. 2019. Vol. 19. № 20. P. 4592. doi:10.3390/s19204592
41. Leong V., Schilbach L. The promise of two-person neuroscience for developmental psychiatry: using interaction-based sociometrics to identify disorders of social interaction. *The British Journal of Psychiatry*. 2019. Vol. 215. № 5. pp. 636–638. doi:10.1192/bjp.2019.73.

42. Levy J., Goldstein A., Feldman R. Perception of social synchrony induces mother–child gamma coupling in the social brain. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*. 2017. Vol. 12. № 7. pp. 1036–1046. doi:10.1093/scan/nsx032
43. Li T., Li G., Xue T., Zhang J. Analyzing brain connectivity in the mutual regulation of emotion–movement using bidirectional granger causality. *Frontiers in Neuroscience*. 2020. Vol. 14. P. 369. doi:10.3389/fnins.2020.00369
44. Liu D., Liu S., Liu X., Zhang C., Li A., Jin C., Chen Y., Wang H., Zhang X. Interactive brain activity: review and progress on EEG-based hyperscanning in social interactions. *Frontiers in Psychology*. 2018a. Vol. 9. P. 1862. doi:10.3389/fpsyg.2018.01862
45. Mandel A., Bourguignon M., Parkkonen L., Hari R. Sensorimotor activation related to speaker vs. listener role during natural conversation. *Neuroscience Letters*. 2016. Vol. 614. pp. 99–104. doi:10.1016/j.neulet.2015.12.054
46. Montague P.R., Berns G.S., Cohen J.D., King R.D., Apple N., Fisher R.E. Hyperscanning: simultaneous fMRI during linked social interactions. *NeuroImage*. 2002. Vol. 16. № 4. pp. 1159–1164. doi:10.1006/nimg.2002.1150
47. Mu Y., Guo C., Han S. Oxytocin enhances inter-brain synchrony during social coordination in male adults. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*. 2016. Vol. 11. № 12. pp. 1882–1893. doi:10.1093/scan/nsw106
48. Müller V., Lindenberger U. Hyper-brain networks support romantic kissing in humans. *PLoS ONE*. 2014. Vol. 9. № 11. doi:10.1371/journal.pone.0112080.
49. Müller V., Sängler J., Lindenberger U. Intra- and inter-brain synchronization during musical improvisation on the guitar. *PloS One*. 2013. Vol. 8. № 9. P. e73852. doi:10.1093/scan/nsw106
50. Naeem M., Prasad G., Watson D.R., Kelso J.A.S. Functional dissociation of brain rhythms in social coordination. *Clinical Neurophysiology*. 2012b. Vol. 123. № 9. pp. 1789–1797. doi:10.1016/j.clinph.2012.02.065

51. Nastase S.A., Gazzola V., Hasson U., Keysers C. Measuring shared responses across subjects using intersubject correlation. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*. 2019. Vol. 14. № 6. pp. 667–685. doi:10.1093/scan/nsz037
52. Novembre G., Knoblich G., Dunne L., Keller P.E. Interpersonal synchrony enhanced through 20 Hz phase-coupled dual brain stimulation. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*. 2017. Vol. 12. № 4. pp. 662–670. doi:10.1093/scan/nsw172
53. Novembre G., Sammler D., Keller P.E. Neural alpha oscillations index the balance between self-other integration and segregation in real-time joint action. *Neuropsychologia*. 2016. Vol. 89. pp. 414–425. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2016.07.027
54. Nozawa T., Sasaki Y., Sakaki K., Yokoyama R., Kawashima R. Interpersonal frontopolar neural synchronization in group communication: An exploration toward fNIRS hyperscanning of natural interactions. *NeuroImage*. 2016. Vol. 133. pp. 484–497. doi:10.1016/j.neuroimage.2016.03.059
55. Pan Y., Cheng X. Two-person approaches to studying social interaction in psychiatry: uses and clinical relevance. *Frontiers in Psychiatry*. 2020. Vol. 11. P. 301. doi:10.3389/fpsy.2020.00301
56. Pan Y., Cheng X., Zhang Z., Li X., Hu Y. Cooperation in lovers: An fNIRS-based hyperscanning study. *Human Brain Mapping*. 2017. Vol. 38. № 2. pp. 831–841. doi:10.1002/hbm.23421
57. Pan Y., Dikker S., Goldstein P., Zhu Y., Yang C., Hu Y. Instructor-learner brain coupling discriminates between instructional approaches and predicts learning. *NeuroImage*. 2020. Vol. 211. P. 116657. doi:10.1016/j.neuroimage.2020.116657
58. Poulsen A.T., Kamronn S., Dmochowski J., Parra L.C., Hansen L.K. EEG in the classroom: synchronised neural recordings during video presentation. *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. № 1. P. 43916. doi:10.1038/srep43916
59. Redcay E., Dodell-Feder D., Pearrow M.J., Mavros P.L., Kleiner M., Gabrieli J.D.E., Saxe R. Live face-to-face interaction during fMRI: a new tool for social

- cognitive neuroscience. *NeuroImage*. 2010. Vol. 50. № 4. pp. 1639–1647. doi:10.1016/j.neuroimage.2010.01.052
- 60.Redcay E., Schilbach L. Using second-person neuroscience to elucidate the mechanisms of social interaction. *Nature Reviews Neuroscience*. 2019. Vol. 20. № 8. pp. 495–505. doi:10.1038/s41583-019-0179-4
- 61.Renvall V., Kauramäki J., Malinen S., Hari R., Nummenmaa L. Imaging real-time tactile interaction with two-person dual-coil fMRI. *Frontiers in Psychiatry*. 2020. Vol. 11. P. 279. doi:10.3389/fpsy.2020.00279
- 62.Saito D.N., Tanabe H.C., Izuma K., Hayashi M.J., Morito Y., Komeda H., Uchiyama H., Kosaka H., Okazawa H., Fujibayashi Y., Sadato N. “Stay tuned”: inter-individual neural synchronization during mutual gaze and joint attention. *Frontiers in Integrative Neuroscience*. 2010. Vol. 4. P. 127. doi:10.3389/fnint.2010.00127
- 63.Sänger J., Müller V., Lindenberger U. Intra- and interbrain synchronization and network properties when playing guitar in duets. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2012. Vol. 6. P. 312. doi:10.3389/fnhum.2012.00312
- 64.Schilbach L., Timmermans B., Reddy V., Costall A., Bente G., Schlicht T., Vogeley K. Toward a second-person neuroscience 1. *Behavioral and Brain Sciences*. 2013. Vol. 36. № 4. pp. 393–414. doi:10.1017/S0140525X12000660
- 65.Schilbach L., Wilms M., Eickhoff S.B., Romanzetti S., Tepest R., Bente G., Shah N.J., Fink G.R., Vogeley K. Minds made for sharing: initiating joint attention recruits reward-related neurocircuitry. *Journal of Cognitive Neuroscience*. 2010. Vol. 22. № 12. pp. 2702–2715. doi:10.1162/jocn.2009.21401
- 66.Stolk A., Noordzij M.L., Verhagen L., Volman I., Schoffelen J.-M., Oostenveld R., Hagoort P., Toni I. Cerebral coherence between communicators marks the emergence of meaning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2014. Vol. 111. № 51. pp. 18183–18188. doi:10.1073/pnas.1414886111
- 67.Szymanski C., Müller V., Brick T.R., von Oertzen T., Lindenberger U. Hypertranscranial alternating current stimulation: experimental manipulation of inter-



- brain synchrony. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2017. Vol. 11. P. 539. doi:10.3389/fnhum.2017.00539
68. Szymanski C., Pesquita A., Brennan A.A., Perdakis D., Enns J.T., Brick T.R., Müller V., Lindenberger U. Teams on the same wavelength perform better: Inter-brain phase synchronization constitutes a neural substrate for social facilitation. *NeuroImage*. 2017. Vol. 152. pp. 425–436. doi:10.1016/j.neuroimage.2017.03.013
69. Tomlin D., Kayali M.A., King-Casas B., Anen C., Camerer C.F., Quartz S.R., Montague P.R. Agent-specific responses in the cingulate cortex during economic exchanges. *Science*. 2006. Vol. 312. № 5776. pp. 1047–1050. doi:10.1126/science.1125596
70. Toppi J., Borghini G., Petti M., He E.J., Giusti V.D., He B., Astolfi L., Babiloni F. Investigating cooperative behavior in ecological settings: an EEG hyperscanning study. *PLOS ONE*. 2016. Vol. 11. № 4. P. e0154236. doi:10.1371/journal.pone.0154236
71. Wang C., Zhang T., Shan Z., Liu J., Yuan D., Li X. Dynamic interpersonal neural synchronization underlying pain-induced cooperation in females. *Human Brain Mapping*. 2019. Vol. 40. № 11. pp. 3222–3232. doi:10.1002/hbm.24592
72. Xu J., Slagle J.M., Banerjee A., Bracken B., Weinger M.B. Use of a portable functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) System to examine team experience during crisis event management in clinical simulations. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2019. Vol. 13. P. 85. doi:10.3389/fnhum.2019.00085
73. Yun K., Chung D., Jeong J. Emotional interactions in human decision making using EEG hyperscanning. *International Conference of Cognitive Science*. 2008. P. 4.
74. Zhang M., Liu T., Pelowski M., Yu D. Gender difference in spontaneous deception: a hyperscanning study using functional near-infrared spectroscopy. *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. № 1. P. 7508. doi:10.1038/s41598-017-06764-

75. Zhang Y., Meng T., Hou Y., Pan Y., Hu Y. Interpersonal brain synchronization associated with working alliance during psychological counseling. *Psychiatry Research: Neuroimaging*. 2018. V. 282. pp. 103–109. doi:10.1016/j.psychresns.2018.09.007
76. Zhdanov A., Nurminen J., Baess P., Hirvenkari L., Jousmäki V., Mäkelä J.P., Mandel A., Meronen L., Hari R., Parkkonen L. An internet-based real-time audiovisual link for dual MEG recordings. *PLOS ONE*. 2015. Vol. 10. № 6. P. e0128485. doi:10.1371/journal.pone.0128485
77. Zhou G., Bourguignon M., Parkkonen L., Hari R. Neural signatures of hand kinematics in leaders vs. followers: a dual-MEG study. *NeuroImage*. 2016. Vol. 125. pp. 731–738. doi:10.1016/j.neuroimage.2015.11.002