

На правах рукописи

МЕРКУЛОВА ЕКАТЕРИНА АЛЕКСЕЕВНА

**ЭЭГ-КОРЕЛЛЯТЫ
РЕАКТИВНОГО СОЦИАЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА**

19.00.02 – психофизиология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Новосибирск - 2021

Работа выполнена в лаборатории дифференциальной психофизиологии Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Научно-исследовательский институт нейронаук и медицины» (НИИНМ), г. Новосибирск.

Научный руководитель –

Князев Геннадий Георгиевич, доктор биологических наук, заведующий лабораторией дифференциальной психофизиологии Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Научно-исследовательский институт нейронаук и медицины» (НИИНМ), г. Новосибирск.

Официальные оппоненты:

Штарк Маркс Борисович – доктор биологических наук, академик РАН, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федерального исследовательского центра фундаментальной и трансляционной медицины» МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, г. Новосибирск;

Благовещенский Евгений Дмитриевич – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Центр Нейроэкономики и Когнитивных Исследований, Национальный Исследовательский Университет «Высшая Школа Экономики»; Старший научный сотрудник, лаборатория нейробиологии и молекулярной фармакологии, Институт Трансляционной Биомедицины, Санкт-Петербургский Государственный Университет, г. Москва, г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация – Учреждение РАН «Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН», г. Москва.

Защита диссертации состоится « ____ » _____ 2021 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 001.014.01 на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Научно-исследовательский институт физиологии и фундаментальной медицины» по адресу: 630117, г. Новосибирск, ул. Тимакова, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Научно-исследовательский институт физиологии и фундаментальной медицины», <http://physiol.ru>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д-р биол. наук

В.Н. Мельников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы и степень ее разработанности

Социальные взаимодействия играют важную роль в жизни как отдельно взятого человека, так и общества в целом. Изучение активности мозга при социальных взаимодействиях (Baron-Cohen et al., 1985; Adolphs, 1999) позволяет лучше понять нейрофункциональную основу разнообразных патологических состояний (таких как аутизм, депрессия, синдром дефицита внимания и др.), а также в будущем совершенствовать методы диагностики и коррекции упомянутых состояний [эпилепсии (Miano, Peraita-Adrados, 2013), аутизма (Baron-Cohen et al., 1985; Khreisat, 2011; Khreisat, 2012; Grossi et al., 2017), депрессии (Лапин, Алфимова, 2014; Zelenina, Prata, 2019), синдрома дефицита внимания (Zhang et al., 2017)].

Широкое распространение нашла теория, согласно которой социальное взаимодействие – это основной фактор, который в процессе эволюции формировал человеческий мозг (Dunbar, 2003; Gowlett et al., 2012). Эту теорию подтверждают обширные исследования в целом ряде научных областей: палеоантропологии, археологии, этнографии, лингвистики и, в частности, нейрофизиологические исследования в приматологии (Barrett, Henzi, 2005). Именно взаимодействие в социуме привело к появлению присущих человеку когнитивных способностей (Fiske, Taylor, 1991; Leyens et al., 1994; Hogg, Abrams, 1999), появлению и развитию языка, как средства коммуникации (Van Dijk, 1990; Semin, Fiedler, 1992; Gibson et al., 1993), абстрактного мышления (Förster et al., 2004). Человеческое сознание, в том виде, как мы его сейчас понимаем, есть продукт развития механизмов коммуникации между людьми (Goffman, 1955; Kraut, Higgins, 1984; Leyens et al., 1994).

При социальном взаимодействии выделяют два типа поведения: проактивное и реактивное поведение, различающиеся вкладом волевой компоненты. Проактивный тип поведения, при котором действия вырабатываются в результате целеполагания (Raine, 2002; Miller, Lynam, 2006; Gibbons et al. 2004; Ohtomo, Hirose, 2007; Hubbard et al., 2010; Brugman et al., 2015) сложен для моделирования. Не менее интересный, но, тем не менее, слабоизученный тип поведения – реактивное поведение, т.е. действия, возникающие спонтанно в ответ на внешний

стимул (триггер), непреднамеренно, на подсознательном уровне, на основе ситуационных факторов (Laureano-Cruces et al., 2001; Kempes et al., 2005; Lickley et al., 2018; Knyazev et al., 2019). В отличие от проактивного поведения реактивный тип проще в постановке эксперимента и более управляем, что и обуславливает практический и теоретический интерес к реактивному типу поведения.

В настоящее время основной подход к исследованию реактивного поведения – наблюдение за реакцией испытуемых и последующая интерпретация полученных данных. Большинство исследований направлено на изучение агрессивного поведения. Установлено, что реактивное агрессивное поведение, или реактивная агрессия, выполняет защитную функцию, и проявляется в случаях недостатка информации о намерениях партнера по социальному взаимодействию, которому, как правило, атрибутируются агрессивные цели, тогда как проактивная агрессия – это средство манипуляции, которое направлено на достижение контроля над поведением партнера, принуждение его к определенным действиям (Dodge, Coie, 1987). Реактивная агрессия положительно коррелирует с фактами курения, алкоголизма, наркомании в семье (Connor et al., 2004), склонностью к правонарушениям (Fite, Colder, 2007), склонностью к негативным эмоциям (Miller, Lynam, 2006; Vitaro et al., 2006a; Vitaro et al., 2006b), эмоциональной нестабильностью (Dodge et al., 1997), повышенным уровнем кортизола (Van Bokhoven et al., 2005) и преобладает в раннем возрасте (Connor et al., 2004). Реактивный тип агрессивного поведения имеет четкие психологические и психофизиологические корреляты, в частности, реактивная агрессия коррелирует с антисоциальностью и импульсивностью (Hecht, Lutzman, 2015). Выявлена положительная корреляция реактивной агрессии с гневливостью (склонностью быстро переходить к эмоции гнева и проявлять недовольство) испытуемого (Veenstra et al., 2018).

Другие виды реактивного социального взаимодействия, в частности, дружественное реактивное поведение (реактивная дружественность), изучены мало (Poulin, Boivin, 2000). Находятся в стадии активного изучения и нейрофизиологические процессы, характерные для реактивного поведения (Knyazev et al., 2002; Knyazev et al., 2004a; Knyazev et al., 2008; Knyazev et al., 2016; Knyazev et al., 2019). Отличительные особенности этих исследований:

- использование виртуальной среды социального взаимодействия (ВССВ), реализуемой программно на базе платформы Inquisit и базы фотографий Экмана (Ekman, Friesen, 1972),
- предъявление испытуемому тестовых ситуаций, связанных с социальным взаимодействием, и регистрация мозговой активности испытуемого с помощью электроэнцефалографии (ЭЭГ).

Использование ВССВ позволяет изучать реактивное поведение в широком ситуативном диапазоне несмотря на сложность модели социального взаимодействия (Schmidt, 2000), а получаемые в экспериментах ЭЭГ-данные позволяют изучать корреляцию реактивного поведения с электрофизиологическими показателями.

К настоящему времени с помощью метода ЭЭГ-ВССВ выявлено, что реактивная дружелюбность характерна для общительных испытуемых, в то время как люди с высокой тревожностью предпочитают стратегию уклонения как от конфронтации, так и от кооперации с партнером по социальному взаимодействию (Knyazev et al., 2015).

Таким образом, изучение нейрофизиологических процессов, возникающих при реактивном социальном взаимодействии, методами электроэнцефалографии, актуально как в силу малоизученности вопроса, так и в силу значимости получаемых при этом знаний.

Цель работы – исследовать реактивное социальное поведение человека методами электроэнцефалографии с использованием виртуальной среды социального взаимодействия.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Исследовать роль осцилляторной электрической активности мозга в качестве медиатора связи между эмоциональной валентностью стимула и реакции в процессе социальных взаимодействий.
2. Выяснить связь личностных черт с активностью психофизиологических процессов (опосредующих реактивное социальное поведение), проявляющихся в эффекте медиации при реактивном социальном поведении.
3. Определить степень надежности получаемых экспериментальных данных в виртуальной среде социального взаимодействия.

Научная новизна

1. Впервые выявлено, что связь между эмоциональной валентностью стимула и поведенческой реакцией при реактивном социальном взаимодействии опосредуется (медируется) связанной с предъявлением стимула синхронизацией тета-ритма в правой височно-теменной области.

2. Впервые показано, что сила эффекта медиации, который проявляется в синхронизации тета-ритма в правой височно-теменной области, при реактивном социальном взаимодействии положительно связана с чертой конформности (agreeableness) в рамках пятифакторной модели личности.

3. Впервые обнаружен эффект медиации для неактивного компонента поведения при социальном взаимодействии в левой первичной соматомоторной коре.

Теоретическая значимость результатов исследования заключается в выявлении связи такого параметра личности как конформность, с психофизиологическим процессом, опосредующем реактивное социальное поведение, а также в уточнении функциональной специализации мозговых структур при социальном реактивном поведении (правой височно-теменной области и левой первичной соматомоторной коры).

Практическая значимость результатов исследования состоит в возможности использования их для диагностики и контроля эффективности лечения патологий социального поведения, а также в образовательном процессе.

Методология и методы исследования

Исследование проведено в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Научно-исследовательский институт нейронаук и медицины» (НИИНМ) в соответствии с принципами Хельсинской декларации и одобрено решением этического комитета НИИНМ.

В методологическом отношении для изучения нейрофизиологических механизмов у испытуемых применялись широко используемые в зарубежных и отечественных исследованиях методы многоканальной регистрации и анализа электрической активности мозга и стандартизированные личностные опросники.

Для решения поставленных задач во время экспериментов регистрировалась многоканальная ЭЭГ с последующим расчетом значений спектральной мощности

источников электрической активности в определенных участках мозга в стандартных частотных диапазонах в зависимости от предъявляемого стимула. Обработка ЭЭГ данных осуществлялась с помощью программных пакетов в среде MATLAB (EEGLAB, Mediation toolbox, SPM12, Neuroelf), программного комплекса sLORETA. Статистическую обработку данных проводили с использованием SPSS, SPM12, и sLORETA.

Экспериментальная база исследований – регистрация ЭЭГ-сигналов испытуемого в виртуальной среде социального взаимодействия (BCCB), разработанной в лаборатории дифференциальной психофизиологии НИИ ФФМ, и оценка маркеров факторов «большой пятерки» (опросник международного пула личностных вопросов, international personality item pool, IPIP). Методологическая основа исследований – многоуровневый анализ медиации, в котором независимая переменная – категория эмоционального стимула, медиатор – спектральная мощность источников мозговой активности, а зависимая переменная – поведенческая реакция на стимул.

Перечень использованных методов:

1. Регистрация ЭЭГ в BCCB.
2. Первичная обработка полученных данных (устранение артефактов, унификация, интерполяция) библиотеками программных пакетов MATLAB (EEGLAB, Mediation toolbox, SPM12, Neuroelf).
3. Локализация источников ЭЭГ активности с помощью пакета sLoreta.
4. Медиационный анализ полученных данных (multilevel mediation analysis toolbox MATLAB).
5. Статистический анализ методами статистического параметрического картирования с помощью пакета программ SPM12.
6. Регрессионный анализ (метод линейной регрессии, SPSS Statistics).
7. Многофакторный дисперсионный анализ (метод ANOVA, SPSS Statistics).
8. Надежность данных, получаемых в BCCB (метод test-retest reliability, SPSS Statistics).
9. Методы структурного программирования для создания сценариев (scripts) групповой обработки данных в пакете программ MATLAB.

Положения, выносимые на защиту:

1. Установлена связь между эмоциональными стимулами и поведенческой реакцией при реактивном поведении, которая опосредуется тета-активностью в правой височно-теменной области коры. Связанная с событиями тета-активность возрастает по мере усиления угрозы для испытуемого, и сопровождается повышенной вероятностью более агрессивного поведенческого ответа.

2. Установлена положительная связь эффекта медиации с личностной чертой «конформность» (agreeableness) из пятифакторной модели личности.

3. Установлено, что данные, полученные с помощью ВССВ, имеют степень надежности ранга “хорошая” в соответствии с методикой test-retest reliability.

Результаты, выносимые на защиту, соответствуют паспорту специальности 19.00.02 - психофизиология в пп. «Психическое явление как форма существования индивидуального сознания и его физиологическое основание», «методы картирования структур и функций мозга в психофизиологии», «компьютерное обеспечение психофизиологического эксперимента».

Публикации. По результатам исследования опубликовано 12 работ. Из них 5 статей в рецензируемых журналах из списка ВАК (4 индексируются в Scopus, 3 в Web of Science).

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных в исследовании результатов обеспечена проведением экспериментальных тестов в соответствии с принятыми стандартами и достаточным количеством объектов исследования.

Основные результаты работы были представлены на трех международных и двух Российских научных мероприятиях: на Ежегодной Международной конференции «ОНВМ 2018» (Сингапур, 2018), 19-ом мировом конгрессе по психофизиологии Международной организации психофизиологии (Лукка, Италия, 2018). Международной научной конференции «Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2017» (Новосибирск, 2017), Молодежной конкурс-конференции «Оптические и информационные технологии», 2017 (Новосибирск, 2017).

Объем и структура диссертации

Диссертация изложена на 147 страницах текста, включает 18 рисунков и 2 таблицы, состоит из введения, обзора литературы, описания методов исследования, изложения результатов собственных исследований, их обсуждения, заключения,

выводы и списка литературы, включающего 442 работы (из них 10 отечественных). Приложения содержат образцы анкет испытуемых, промежуточные и вспомогательные материалы, и акты о внедрении, подтверждающие практическую ценность проведенного исследования.

Личный вклад автора

Представленные в диссертационном исследовании результаты были получены автором либо лично, либо при его непосредственном участии.

Автором лично выполнены следующие задачи:

1. Участие в сборе данных.
2. Первичная обработка ЭЭГ данных.
3. Численная обработка и установление связь индивидуальных различий в процессах реактивного поведения с личностью, с параметрами «большой пятерки».
4. Локализация участков мозга, участвующих в реактивном социальном взаимодействии, и характер связанных с этим изменений спектральной мощности.
5. Обнаружение и анализ эффекта опосредования (эффекта медиации).
6. Выявление высокой степени надежности получаемых экспериментальных данных в соответствии с критерием test-retest reliability.
7. Разработка пакета программ для групповой обработки ЭЭГ-данных.
8. Участие в написании статей, в том числе, в качестве ответственного автора.

Автор выражает благодарность за помощь в исследовании коллегам за проведение эксперимента: д.ф.н. Александру Николаевичу Савостьянову, к.б.н. Андрею Викторовичу Бочарову, Надежде Васильевне Дмитриенко и всем участникам исследования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Испытуемые и организация исследования

В выборку вошли 43 участника (16 мужчин, средний возраст 24 ± 6 лет) Для участия в эксперименте не допускались люди с неврологическими, психическими и серьезными соматическими заболеваниями, с повреждениями головного мозга. Все испытуемые были праворукими согласно опроснику Аннет (Annett, 1970) и имели нормальное или скорректированное до нормального зрение. Участники получали за участие в эксперименте вознаграждение, эквивалентное примерно 5% от ежемесячного прожиточного минимума. Все испытуемые дали информированное

согласие и заполнили анкеты перед экспериментом, где учитывались многие стандартные параметры и фаза менструального цикла у женщин (Bazanova, 2003). При проведении исследований соблюдались все применимые руководящие принципы и положения о защите объектов в соответствии с Хельсинкской декларацией. Все участники дали информированное согласие на исследование. Работа была одобрена Этическим комитетом ФГБУ НИИ физиологии и фундаментальной медицины СО РАМН.

Исследование состояло из двух частей – выполнения игры в среде ВССВ (испытуемый реагировал одним из трех типов после предъявления эмоционального выражения лица) с параллельной регистрацией ЭЭГ и заполнения личностных опросников.

Экспериментальное исследование

Схема эксперимента с регистрацией ЭЭГ и заполнением опросников (рис. 1).

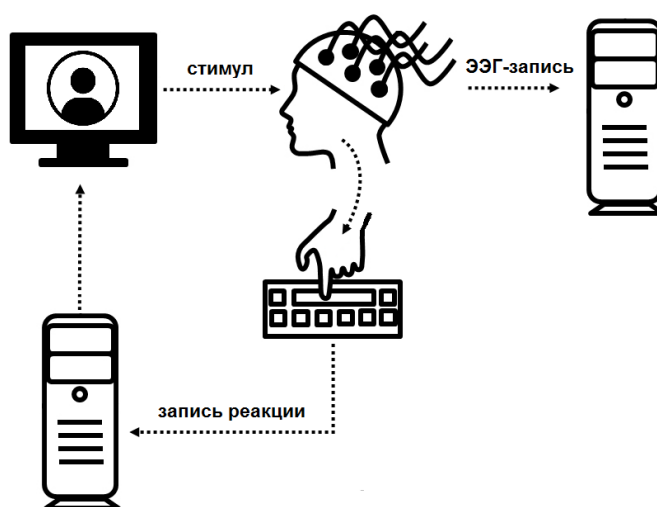


Рисунок 1. Схема эксперимента

Испытуемых размещали в звуконепроницаемой, тускло освещенной комнате. На экране предъявляли инструкцию с предложением отреагировать.

В случае эксперимента по определению связи фактора личности с реактивным поведением в качестве стимуляции использовали комплект фотографий, представленных Экманом и Фризенем (Ekman, Friesen, 1972). Были отобраны 30 фотографий: 5 разных женских и 5 разных мужских лиц с тремя различными

выражениями лица (гневное, нейтральное и счастливое). Количество лицевых стимулов составляло 60 для каждого участника, включая 20 лиц каждой категории.

Фотографии были представлены черно-белыми изображениями размером 17 × 17 см и отображались на экране на расстоянии 120 см от объекта. Испытуемым предлагали выбрать один из трех вариантов реакции на предъявляемый стимул: «подружиться», «избежать» или «атаковать» (Knyazev et al., 2015). Эти три вида социального взаимодействия являются ведущими по мнению ряда специалистов (Айзенк, 1999; Kagan, Snidman, 1999; Eysenck, Wilson, 2000) Участников просили представить, что лица, которые они видят на экране, являются реальными живыми людьми. Принимая во внимание тот факт, что личностные опросники демонстрируют, как правило, поведение людей в реальных жизненных ситуациях, наблюдения эксперимента в этой модели показывают поведение, приближенное к действительной реальной жизни.

Сначала появлялся крест в центре экрана в течение 1 секунды в качестве сигнала готовности. Затем предъявлялись фотографии лиц (Рис.2). Гневные, счастливые и нейтральные лица предъявляли случайным образом, а интервал между стимулами варьировался между 4 и 7 с. Скорость реакции определяли по времени, которое тратит испытуемый от момента предъявления креста до момента нажатия клавиши, соответствующей выбранной реакции.

Для определения характеристик личности в рамках пятифакторной модели использовали опросник маркеров факторов «большой пятерки» (Big Five Factor Markers, Князев с соавт., 2010) (<http://ipip.ori.org/newItemTranslations.htm>), которая ранее продемонстрировала хорошую надежность и достоверность в популяции России (Князев с соавт., 2010).

Общая продолжительность экспериментальной части с ЭЭГ составляла около 2-2,5 часов в зависимости от скорости выполнения задания испытуемыми.

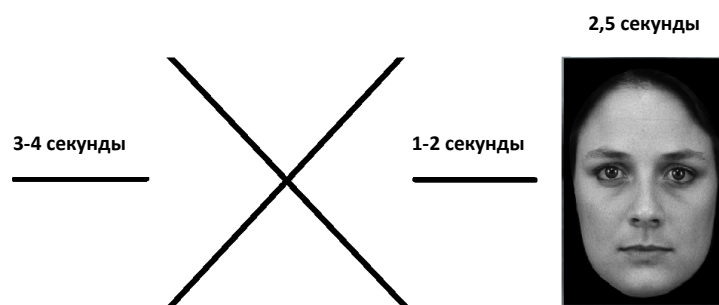


Рисунок 2. Схема одного испытания. После того, как в течение 1-2 секунд появлялся крест в виде сигнала готовности, целевой стимул (т. е. изображение гневного, нейтрального или счастливого лица) предъявлялся в течение примерно 2,5 секунд, пока субъект не выберет одну из трех реакций («подружиться», «избежать» или «атаковать»).

Запись и обработка ЭЭГ

Запись ЭЭГ была получена с использованием 118 электродов, установленных в NSL Quik-Cap128 в соответствии с расширенной международной системой 10-10 и усилителями Sinamp (США) с аналоговым полосовым фильтром 0,1-100 Гц. Частота дискретизации была установлена равной 1000 Гц. В качестве заземления использовали фронтально-центральный электрод, а в качестве референтного электрода – электрод Cz. Сопротивления электродов поддерживали на уровне или ниже 5 кОм. Артефакты ЭЭГ данных были скорректированы с использованием анализа независимых компонентов с помощью инструментария EEGLab (<http://www.sccn.ucsd.edu/eeglab/>). Оцифровку координат электродов производили с помощью дигитайзера Fastrak 3D Digitizer (<https://polhemus.com/motion-tracking/all-trackers/fastrak/>).

3-D реконструкция ЭЭГ-сигнала

Локализацию источников электрических сигналов в функциональных областях коры головного мозга проводили с использованием программы sLORETA (Pascual-Marqui R.D., 2002), (<http://www.uzh.ch/keyinst/NewLORETA/sLORETA/sLORETA-Math01.pdf>).

Пространство решения было ограничено корковым серым веществом и парагиппокамповыми зонами. Определение координат и параметров источников

электрической активности в головном мозге по ЭЭГ-данным (или 3D-реконструкция) производили на основе решения обратной задачи (Гнездинский, 2004).

Алгоритм подготовки входных данных для анализа опосредования (медиационного анализа) проводили с помощью программ sLORETA и MATLAB-сценариев на основе библиотеки EEGLAB из ЭЭГ записей в виде event-related осцилляций. Для этого в sLORETA сначала рассчитывали спектральные мощности в тестовом и в фоновом интервале исходных данных, а затем в MATLAB считали разницу логарифмов этих показателей и результат переводили обратно в пакет sLORETA. В результате работы пакет sLORETA формировал набор slor-файлов. Каждый slor-файл характеризовал мозговую активность во время отдельной эпохи в выделенном частотном диапазоне.

Для последующей обработки методом многоуровневого медиационного анализа полученные файлы преобразовывали в стандартный расширяемый NIFTI-формат, ориентированный на воксельное представление нейроизображений мозга (Cox et al., 2004). Преобразование вели в пакетном режиме созданным MATLAB-сценарием с использованием библиотеки spm12 (FIL, 2013).

Многоуровневый анализ опосредования или медиационный анализ.

Многоуровневый медиационный анализ (рис. 3) (Wager et al., 2008) основан на классической трехкомпонентной модели опосредования или медиационной модели. Согласно этой модели сначала средствами линейного регрессионного анализа определяли связь между независимой переменной X и медиатором M (путь a) и связь между медиатором M и зависимой переменной Y (путь b). А затем определяли эффект опосредования или медиационный эффект (путь ab , то есть, влияние X на Y , промедиированное M), как произведение регрессионных коэффициентов (Hayes, 2013). Анализ опосредования или медиационный анализ проводили повоксельно, то есть эффект опосредования или медиационный эффект вычисляли для каждого отдельного элемента воксельного представления мозга.

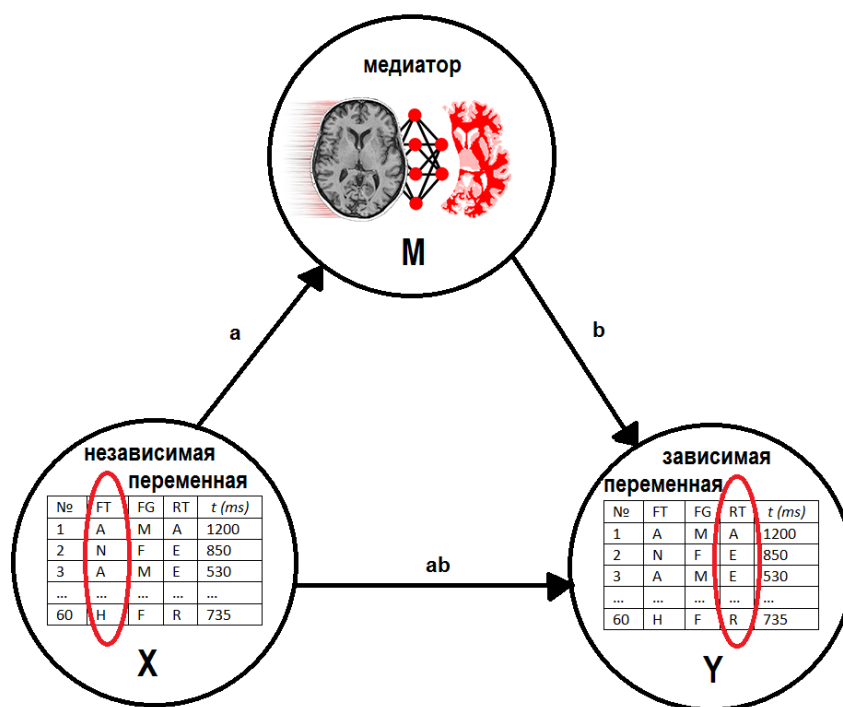


Рисунок 3. Схема анализа опосредования (медиационного анализа)

На первом уровне модель опосредования или медиации оценивали по каждому субъекту отдельно в 60 экспериментальных эпохах. Для изучения реактивного ответа в качестве независимой переменной использовали эмоциональную категорию стимула (шкала: сердитые лица = 1, нейтральные лица = 0 и счастливые лица = -1) и в качестве зависимой переменной использовался ответ-реакция (шкала: атака = 1, избегание = 0, и предложение дружбы = -1). Чтобы исследовать неактивный ответ (т. е. ответ, который не зависел от эмоциональных категорий стимулов), переменная ответа была регрессирована по переменной стимула, а остатки использовали в качестве независимой переменной, тогда как ответ снова использовали в качестве зависимой переменной. В обоих случаях связанные с представлением лица изменения плотности источника тока (т. е. интервал тестирования минус базовый уровень (Makeig, 1993) использовали в качестве опосредующего элемента или опосредователя (медиатора) мозга для реактивного или, соответственно, неактивного поведенческого ответа. На втором уровне анализа провели определение достоверности по всей выборке испытуемых с порогом достоверности $p = 0,001$.

В случае если был выявлен достоверный эффект опосредования (медиации), влияние переменных личности мы оценивали путем вычисления корреляций между

соответствующими шкалами и коэффициентами ab , преобразованными по z -преобразованию Фишера с учетом возраста и пола участников. Статистическую значимость наблюдаемых эффектов оценивали непараметрическим методом с использованием рандомизации по методу бутстрэп (bootstrap) для 5000 образцов с первичным (нескорректированным) порогом 0,001.

Граничный размер кластера определяли с помощью расчета групповой вероятности ошибки первого рода (family-wise error rate, FWER) для множественных сравнений `alphasim` методом моделирования Монте-Карло (Forman, 1995) из библиотеки `Neuroelf` (<http://neuroelf.net/>) на основании размера матрицы, содержащей воксельное представление мозга, и порога достоверности ($p < 0,001$) через симуляцию шума. В результате получен набор воксельных моделей с областями, участвующими в выработке реакции, для каждого из исследуемых частотных диапазонов. Многоуровневый анализ опосредования или медиационный анализ проводили с помощью библиотеки в программе MATLAB пакетом программ `Mediation Toolbox`. (Matlab:Mediation_Toolbox_3_26_2010.zip).

Статистический анализ данных

При исследовании корреляции между показателями ЭЭГ и психометрическими характеристиками использовали метод Пирсона, для коррекции множественных сравнений применяли контроль ложных эффектов (false discovery rate, FDR) (Benjamini, Hochberg, 1995).

Статистический анализ влияния психометрических показателей на поведение проводили с помощью дисперсионного и регрессионного анализа в программе SPSS. Мы использовали многофакторный анализ с повторными измерениями ANOVA с двумя внутри-субъектными факторами: лица (счастливые, нейтральные, агрессивные) и выбор (атакующий, избегающий, дружелюбный). Психометрические переменные использовали в качестве ковариат. Поправку Гринхауса-Гейссера использовали во избежание риска нарушения предположения сферичности в случае необходимости. Зависимые переменные были рассчитаны в процентах от общего количества предъявлений для каждой комбинации из двух факторов.

Для проверки надежности получаемых данных от эксперимента к эксперименту использовали метод «ретестовой надежности» (test-retest reliability) (Trochim, 2018).

Относительную достоверность оценивали путем расчета внутриклассовых коэффициентов корреляции (intraclass correlation coefficient) ICC(3,1) (Shrout, 1979; Koch, 1982).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты поведенческих реакций в эксперименте с тремя типами стимулов

Дисперсионный анализ поведенческих данных (ANOVA для повторных измерений) включал два внутрисубъектных фактора: валентность стимула (три уровня) и тип ответа (три уровня). Для учета влияния пола и возраста испытуемого они вводились как межсубъектный фактор и ковариат, соответственно. Зависимой переменной было количество выборов того, или иного типа поведения в процентах от общего количества предъявлений, или время реакции. При анализе эффектов психометрических переменных оценки по соответствующим шкалам вводили в качестве ковариата. При обнаружении достоверного эффекта психометрической переменной выборку делили по медиане соответствующей психометрической шкалы и анализ повторяли с использованием группирующей переменной (два уровня) в качестве межсубъектного фактора. Достоверных эффектов пола и возраста испытуемых выявлено не было и поэтому все последующие анализы проводились без учета этих переменных.

При использовании количества выборов в качестве зависимой переменной обнаружен достоверный главный эффект типа ответа, $F(2,84) = 61,02$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,59$. Средний процент выборов атаки, избегания и дружбы были 8% (0,08), 42,7% (0,14) и 32,3% (0,13), соответственно (в скобках – величина стандартного отклонения). Взаимодействие валентности стимула с типом ответа также было достоверным, $F(4,168) = 51,51$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,55$. На Рисунке 4 проиллюстрирован эффект взаимодействия валентности стимула с типом ответа. Из этого рисунка видно, что атакуют и избегают чаще гневные лица, а дружбу предлагают счастливым.

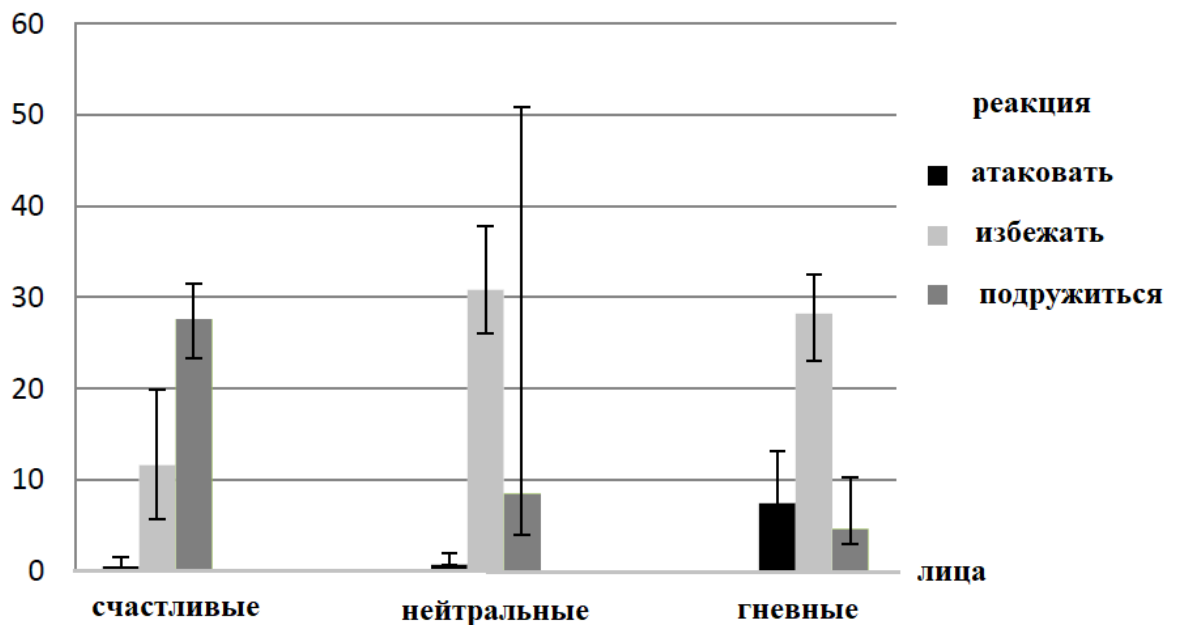


Рисунок 4.

Взаимодействия валентности стимула с ответом, где в качестве зависимой переменной выступает количество выборов.

Анализ психометрических переменных при зависимой переменной «количество выборов» выявил достоверное взаимодействие оценок по шкале нейротизма с фактором «тип ответа»: $F(2, 68) = 3,7$, $p = 0,040$, $\eta^2 = 0,098$, который заключается в том, что испытуемые с высокими оценками нейротизма чаще атакуют и реже предлагают дружбу (рис.5). Достоверные эффекты отсутствовали для всех остальных психометрических переменных.

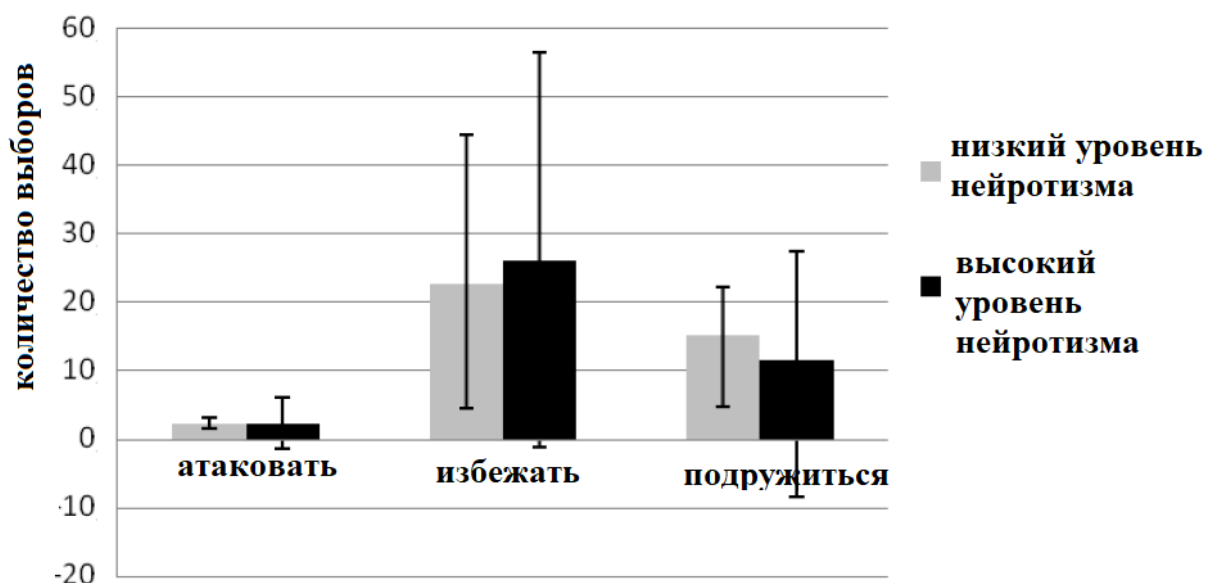


Рисунок 5.

Влияние психометрической переменной нейротизм на реакцию испытуемого, где в качестве зависимой переменной выступает количество выборов.

При использовании скорости реакции в качестве зависимой переменной обнаружен достоверный главный эффект типа ответа, $F(2,84) = 88,94$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,68$, который заключается в том, что для принятия решения на атаку требуется больше всего времени, и быстрее всего принимается решение на избегание. Среднее время реакции на принятие решения атаковать, избежать и подружиться составил 407,9 мс (92,02), 177,2 мс (92,6) 334,4 мс (86,2) соответственно (в скобках – величина стандартного отклонения). Взаимодействие валентности стимула с типом ответа также было достоверным, когда в качестве зависимой переменной выступало время реакции. $F(4,168) = 60,42$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,59$ (рис.6). Смысл эффекта в том, что меньше всего времени требуется, чтобы подружиться со счастливыми лицами и избежать гневных лиц, а больше всего времени, чтобы подружиться с гневными и атаковать счастливые лица.

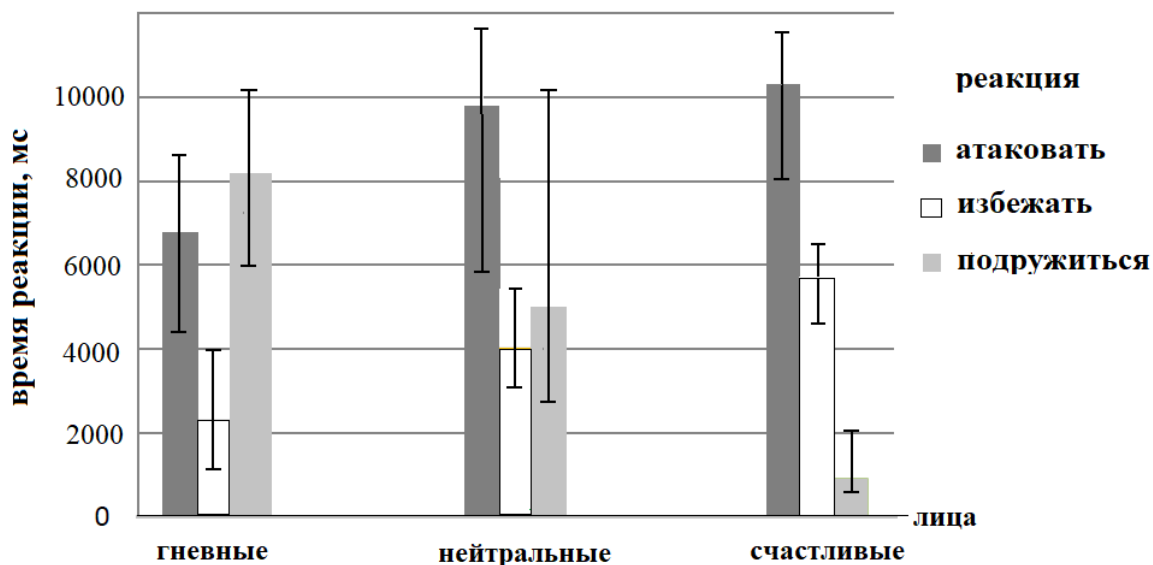


Рисунок 6.

Взаимодействия валентности стимула с ответом, где в качестве зависимой переменной выступает скорость реакции.

При использовании скорости реакции в качестве зависимой переменной обнаружено, что испытуемые с высоким уровнем конформности, по сравнению с испытуемыми с низкими оценками по этой шкале, быстрее принимали решение подружиться и дольше принимали решение атаковать при предъявлении агрессивных лиц, $F(4,136) = 2,9$, $p = 0,025$, $\eta^2 = 0,078$. На рис. 7 изображены данные скорости реакции при предъявлении всех трех типов лиц.

Представленные на Рисунке 4 эффекты показывают, что поведение участников в этой экспериментальной модели является частично реактивным. Реактивное поведение в этом случае означает, что испытуемый должен распознать эмоциональное выражение, интерпретировать его как обращенное к нему и сделать выбор подходящего поведенческого ответа. Все эти процессы должны вовлекать целый каскад структур мозга и при обычном анализе трудно было бы разобраться какая именно структура играет тут решающую роль. Поэтому в этом случае при анализе ЭЭГ данных мы применили двухуровневый анализ медиации.

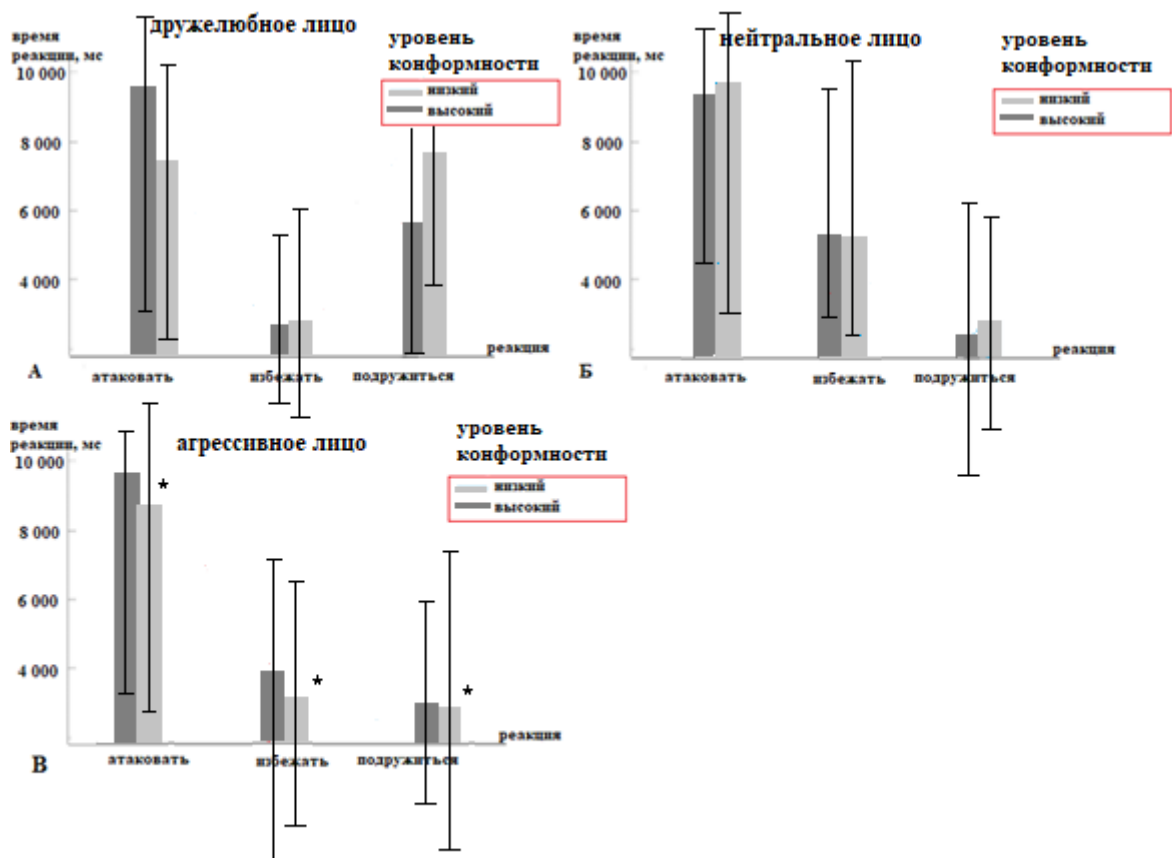


Рисунок 7.

Влияние психометрической переменной конформность на реакцию испытуемого при предъявлении гневного, нейтрального и счастливого выражения лица (а, б, в соответственно), где в качестве зависимой переменной выступает скорость реакции.

Мозг рассматривали как медиатор реактивного поведения. Для проведения анализа опосредования или медиационного анализа трехмерные матрицы активности мозга, созданные с помощью пакета программы sLORETA, где производилась 3D-реконструкция энцефалограммы, преобразовывали в NIFTI формат. На первом уровне анализа у каждого испытуемого находили те области мозга, которые выполняли роль посредника или медиатора между динамикой предъявления стимулов и соответствующих поведенческих ответов. На втором этапе находили структуры, которые показывают достоверный эффект на всей выборке. Поскольку поведение в этой модели не на 100% является реактивным, мы исследовали оставшуюся его часть, т.е. нереактивный ответ. Для этого у каждого

испытуемого отдельно делали регрессию реакции на стимул и остатки регрессии использовали в качестве предиктора.

Реактивный и нереактивный ответ в тета-диапазоне

Многоуровневый медиационный анализ для реактивного ответа

Анализ медиации (рис. 3) включал три пути связи между стимулом и реакцией: 1) путь а, активность мозга, связанная со стимулом; 2) путь б, активность мозга, связанная с реакцией, под контролем стимула; и 3) путь аб, мозговые посредники отношения между стимулом и реакцией (медиаторы между стимулом и реакцией), то есть формальный путь того, объясняет ли область мозга достоверную степень ковариации между эмоциональной категорией лица и поведенческим ответом. Достоверные эффекты медиации были выявлены только в тета-диапазоне частот. Поэтому описаны эффекты только в этой полосе частот.

Путь а: с увеличением аверсивности стимула (радость → нейтральность → гнев) связанная с событием тета-активность увеличилась в левой медиальной лобной извилине (таблица 1, рис. 8).

Путь б, т. е. тета-активность, связанная с поведенческим ответом, не давала достоверных кластеров на выбранном пороге достоверности.

Путь аб: положительный эффект медитации обнаружен в кластере с центром в правой угловой извилине (поле Бродмана 39) (таблица 1, рис. 8). Коэффициенты медиации z-трансформированные по Фишеру (путь аб) коррелировали с конформностью ($r = 0,50$, $p = 0,001$, учитывая возраст и пол участников) (рис. 8), чего не было с другими личностными переменными. Этот эффект остался и после применения поправки Бонферрони ($0,05 / 5 = 0,010$).

Таблица 1

Сводка кластеров, которые показали достоверные эффекты с положительной тенденцией в тета-диапазоне частот при $p < 0,001$ (с поправкой на эффект множественных сравнений).

Ответ	X Y Z	ПБ			
		k	Z_{max}		
Реактивный					
a	Медиальная лобная извилина	- 10 35 40	8	27	8.2
a*b	Правая угловая извилина	35 -60 25	39	14	8.4
Нереактивный					
b	Медиальная лобная извилина	- 10 35 45	8	18	8.6
a*b	Левая пост-центральная извилина	- 30- 30 50	3	19	16.4

X, Y, Z - центр кластера в мм в пространстве стандарта MNI (Montreal Technological Institute);

ПБ – поле Бродмана;

k – количество вокселей;

Z_{max} – на пике кластера.

Эффект опосредования или медиации обусловлен ковариацией между валентностью стимула и реакции.

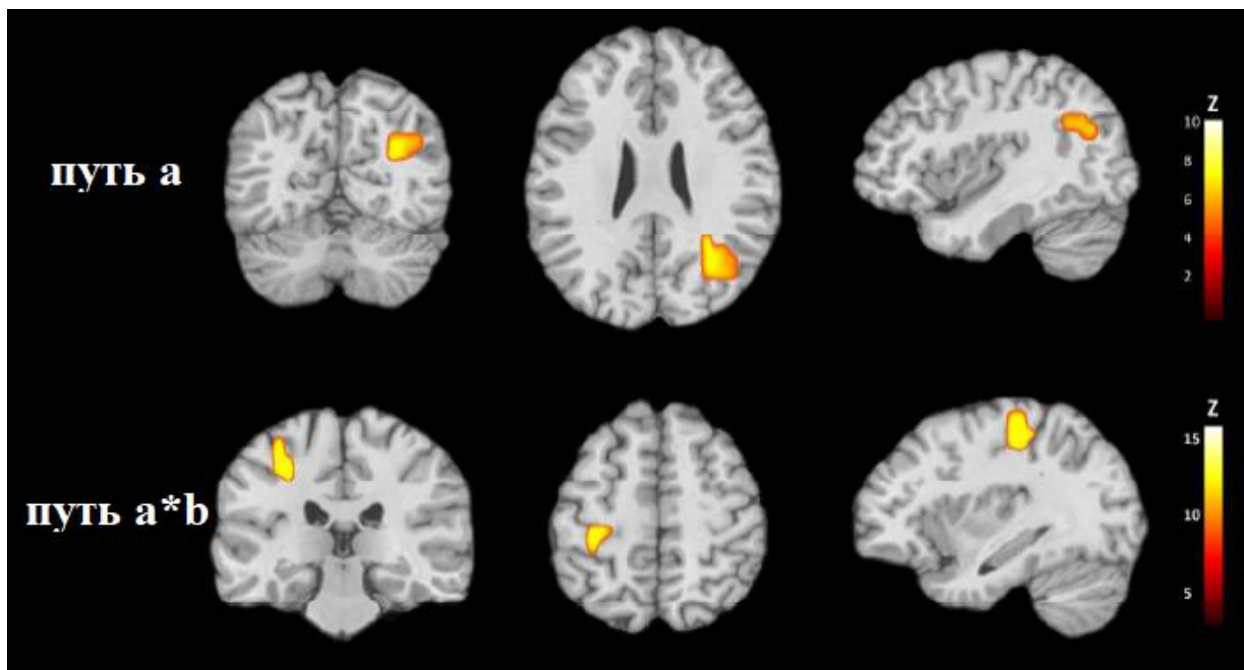


Рисунок 8.

Расположение кластеров, которые показали достоверные эффекты для реактивного ответа. Сечения проходят через центр кластера (см. Таблицу 1).

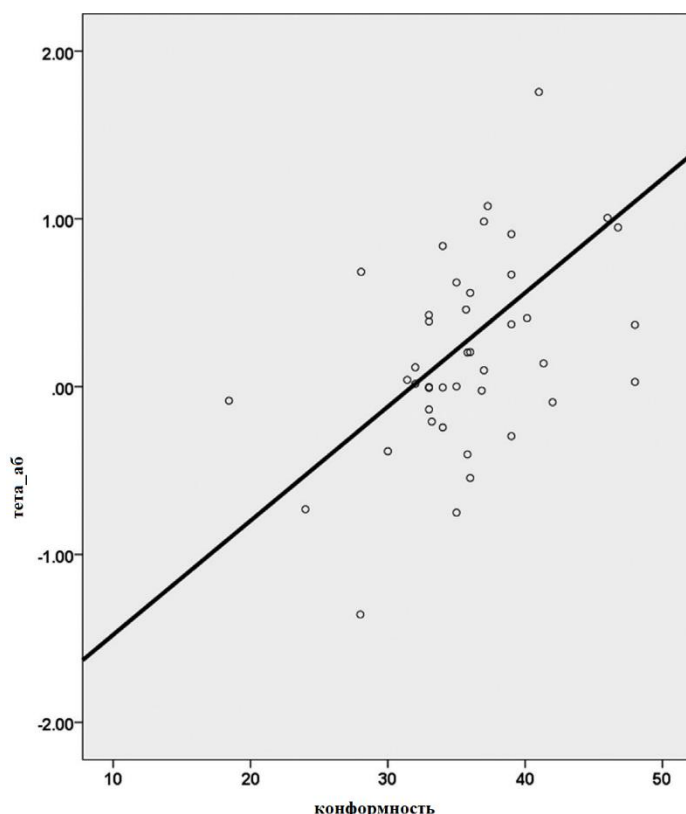


Рисунок 9.

Связь между оценками конформности и коэффициентами медиации, преобразованными по Фишеру z (путь ab) в тета-диапазоне частот в правой угловой извилине для реактивного ответа.

Многоуровневый медиационный анализ для нереактивного ответа

Путь *a* не выявил достоверных кластеров при выбранном пороге значимости. Тестирование пути *b* показало увеличение связанной с событиями тета-активности в левой медиальной лобной извилине (таблица 1, рис. 8). Путь *ab* дал положительный эффект медиации в кластере с центром в левой постцентральной извилине (таблица 1, рис. 8), и этот эффект не коррелировал с личностными переменными. Не было никаких существенных различий в распределении мужчин и женщин по группам ($p > 0,400$). Тем не менее, было выявлено значительное соответствие между группами, выявленными для реактивных и нереактивных ответов ($\chi^2 = 19,4, p = 0,001$).

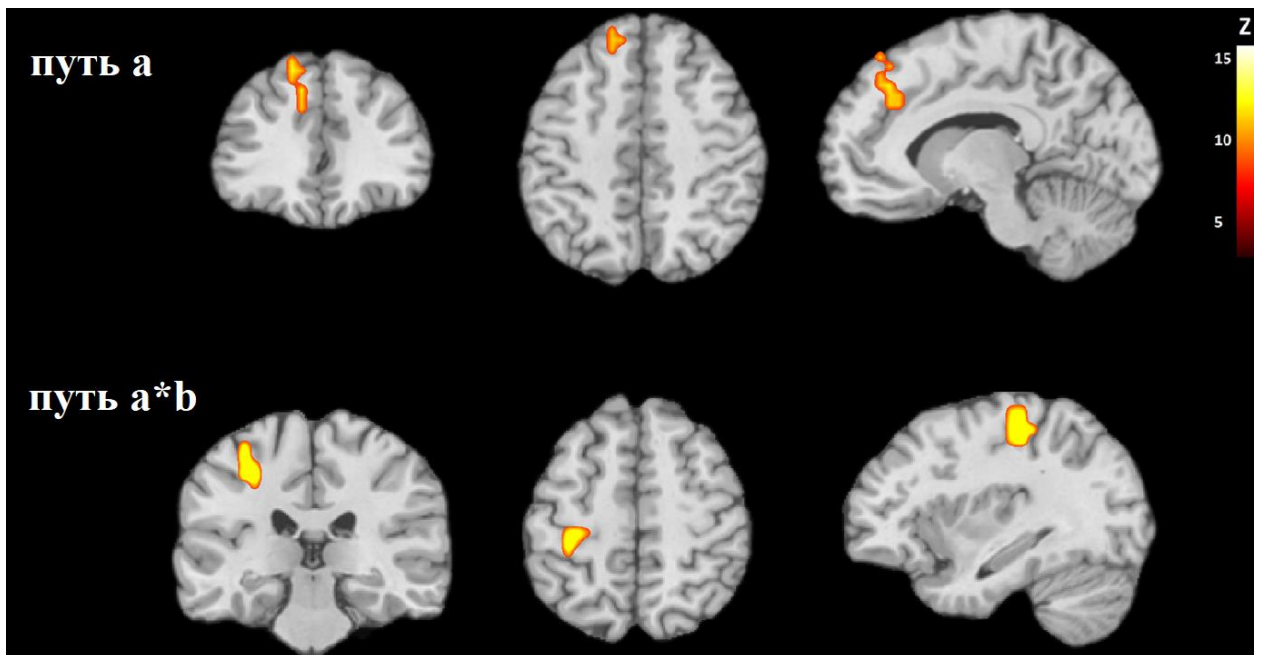


Рисунок 10. Расположение кластеров, которые показали существенные эффекты для нереактивного ответа.

Сечения проходят через центр кластера (см. Таблицу 1).

Надежность эксперимента

Поведенческие показатели реакций от посещения к посещению показали хорошую надежность тестирования по методологии «ретестовой надежности» (среднее значение = 0,741).

ВЫВОДЫ

1. Поведение в модели виртуальных социальных взаимодействий имеет реактивный и нереактивный компоненты.
2. Связь между эмоциональной валентностью стимула и поведенческой реакцией при реактивном социальном взаимодействии опосредуется тета-активностью в правой височно-теменной корковой области.
3. Сила эффекта медиации (опосредования) положительно связана с личностной чертой «конформность» (agreeableness) из пятифакторной модели личности.
4. Эффект медиации для нереактивного компонента поведенческого ответа проявляется в левой первичной соматомоторной коре.
5. Данные, получаемые с помощью ВССВ, имеют степень надежности ранга “хорошая” в соответствии с методикой test-retest reliability.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых журналах

1. Меркулова Е.А. Оценка профессиональных качеств спортсменов по показаниям ЭЭГ// ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ, 2017, Т.9, №1, С.112-113.
2. Меркулова Е.А. Оценка психологических качеств по показаниям электроэнцефалограммы // Оптические и информационные технологии. Материалы молодежной конкурс-конференции, 2017. С.23-24.
3. Knyazev G.G., **Merkulova E.A.**, Savostyanov A.N., Bocharov A.V., Saprigyn A.E. Effect of cultural priming on social behavior and EEG correlates of self-processing// Front. Behav. Neurosci., 2018, V.12, 236. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2018.00236>
4. Knyazev G.G., Savostyanov A.N., Bocharov A.V., **Merkulova E.A.** Resting state connectivity mediates the relationship between collectivism and social cognition// Int. J. Psychophysiol., 2018, V.123, P.17-24. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2017.12.002>
5. **Merkulova E.**, Savostyanov A., Bocharov A., Proshina E., Knyazev G. Test-retest reliability of a social interaction task// Behav. Sci., 2018, V.8(10), 97. <https://doi.org/10.3390/bs8100097>
6. **Меркулова Е.А.**, Зюбин В.Е., Князев Г.Г. Метод проверки гипотез на базе статистической обработки разнородных ЭЭГ-данных// Вестник НГУ. Серия: Информационные Технологии, 2019, Т.17, №1, С.61-71. DOI: 10.25205/1818-7900-2019-17-1-61-71
7. Knyazev G., **Merkulova E.**, Savostyanov A., Bocharov A., Saprigyn A. Personality and EEG correlates of reactive social behavior// Neurophysiologia, 2019, V.124, P.98-107. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2019.01.006>
8. Privodnova E.Yu., Volf N.V., **Merculova E.A.** Changes in background EEG activity after creative task in aged adults// 2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (2019 SIBIRCON), 21-27 October, Novosibirsk-Tomsk-Ekaterinburg, Russia, Conference Proceedings, P.358-360, DOI: [10.1109/SIBIRCON48586.2019.8958329](https://doi.org/10.1109/SIBIRCON48586.2019.8958329)

Материалы конференций, конгрессов и сборники научных трудов

1. **Merkulova E.A.**, Knyazev G.G., Savostaynov A.N., Bocharov A.V. Resting state connectivity mediates the relationship between collectivism and social cognition// OHBM 2018 Annual Meeting, June 17-21, 2018, Singapore.
2. **Merkulova E.**, Savostaynov A., Bocharov A., Knyazev G. Temporo-parietal junction as a mediator of reactive social behavior: the role of agreeableness// Bioinformatics of Genome Regulation and Structure\Systems Biology (BGRS\SB-2018) 11th International Conference, 20-25 August, 2018, Cognitive Sciences, Genomics and Bioinformatics (CSGB-2018) Symposium, 24 August, 2018, Novosibirsk, Russia, Abstracts, P.20.
3. **Merkulova E.A.**, Knyazev G.G., Savostaynov A.N., Bocharov A.V. Agreeableness and reactive social behavior// 19th World Congress of Psychophysiology, September, 4-8, 2018, Lucca, Italy.
4. **Merkulova E.A.**, Knyazev G.G., Savostaynov A.N., Bazovkina D.V., Bocharov A.V., Proshina E.A., Tamognikov C.U., Kawai-Ool U.N., Karpova A.G. Genetic, neurological and cultural factors of inclination to depression among the ethnically different groups// World Psychiatric Association Regional Congress “Integrating Mental Health in Primary Care: Evidence, experience and innovation”, November, 21-23, 2018, Addis Ababa, Ethiopia.
5. Приводнова Е.Ю., **Меркулова Е.А.**, Вольф Н.В. Изменение активности ЭЭГ после решения креативных задач: эффекты усталости и нейропластичности// VI съезд физиологов с международным участием, Сочи-Дагомыс, Россия, 1-6 октября, 2019, Научные труды, С.44.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

FDR – контроль ложных эффектов (false discovery rate)

FWER – коррекции групповой вероятности ошибки (family-wise error rate)

ICC – внутриклассовый коэффициент корреляции (intraclass correlation coefficient)

IPIP – международный пул личностных вопросов Л.Голдберга (international personality item pool)

sLORETA – стандартизированная электромагнитная томография мозга с низким разрешением (standardized low resolution brain electromagnetic tomography)

ВССВ – виртуальная среда социального взаимодействия

ЭЭГ – электроэнцефалография