

ФИЗИОЛОГИЯ ВЫСШЕЙ НЕРВНОЙ (КОГНИТИВНОЙ) ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

УДК 159.91

ФМРТ-ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ НЕЙРОТИЗМА С ИНДИВИДУАЛЬНЫМИ РАЗЛИЧИЯМИ В АКТИВНОСТИ МОЗГА В ПРОЦЕССЕ СОЦИАЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

© 2024 г. Г. Г. Князев^{1, *}, А. Н. Савостьянов^{1, 2, 3}, А. В. Бочаров^{1, 2}, А. Е. Сапрыгин¹

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение

«Научно-исследовательский институт нейронаук и медицины», Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³Федеральный исследовательский центр «Институт цитологии и генетики СО РАН», Новосибирск, Россия

*e-mail: knyazevgg@neuronm.ru

Поступила в редакцию 24.04.2024 г.

После доработки 29.08.2024 г.

Принята к публикации 09.09.2024 г.

Социальные взаимодействия в контексте кооперации и конкуренции являются важнейшим видом активности людей, определяющим их благополучие и успех в жизни. Нейрональные основы этой активности, а также роль связанных с личностью индивидуальных особенностей изучены недостаточно. В частности, в литературе отсутствуют данные о связи нейротизма с индивидуальными различиями в активности мозга в процессе кооперативных и конкурентных взаимодействий, и целью нашей работы было восполнение этого пробела. фМРТ-данные были записаны в ходе выполнения заданий в индивидуальном, кооперативном и конкурентном режимах, и их анализ осуществлялся методом межсубъектного анализа репрезентативного сходства. Результаты анализа показывают, что у предрасположенных к эмоциональной нестабильности людей социальные взаимодействия, как в контексте кооперации, так и в контексте конкуренции, связаны с большим напряжением, проявляющимся в активности центров социального мозга, регуляции эмоций и внимания. Это потенциально может приводить к накоплению последствий социального стресса и появлению симптомов отклонений психического здоровья.

Ключевые слова: социальные взаимодействия, кооперация, конкуренция, фМРТ, анализ сходства репрезентаций, многомерный анализ паттернов

DOI: 10.31857/S0044467724060061

ВВЕДЕНИЕ

Утверждение о том, что человек — существо социальное, стало своего рода клише. Действительно, хотя любой человек может находиться в одиночестве дома или вне его пределов, для большинства людей в большинстве обстоятельств социальное окружение является преобладающим видом окружения, с которым им приходится иметь дело. Поэтому взаимодействие и выстраивание отношений с другими людьми является важнейшим видом деятельности, определяющим благополучие и успех в жизни. Эволюционные теории утверждают, что необходимость поиска оптимального баланса между эгоистическими интересами и общественным благом была движущей силой эволюции человеческого мозга (Dunbar, 2003). Следуя этой логике, можно ожидать, что в мозге должны существовать достаточно развитые модули, лежащие в основе двух основных форм социальных взаимодействий: сотрудничества и конкуренции.

Одним из первых парадигмальных исследований нейронных основ сотрудничества и конкуренции в процессе конструктивной деятельности является работа Дисити с соавторами (Decety et al., 2004). В этом функциональном магнитно-резонансном (фМРТ) исследовании участники играли в компьютерную игру, в которой они должны были строить на экране монитора целевые паттерны либо в сотрудничестве, либо в конкуренции с другим человеком. Сотрудничество сопровождалось активацией медиальной орбитофронтальной коры (ОФК), участвующей в процессах, связанных с вознаграждением. Авторы интерпретируют этот эффект как свидетельство того, что сотрудничество является социально желательным видом социальных взаимодействий. Похожие данные получены в исследовании Полосан с соавторами (Polosan et al., 2011), в котором использовался вариант задачи Струпа. В работе Ли с соавторами (Lee et al., 2018) использовалась задача типа «Тетрис» в индивидуальном, кооперативном и соревновательном вариантах.

Активация дорсолатеральной и дорсомедиальной префронтальной коры (ПФК) наблюдалась как в кооперативном, так и в соревновательном, но не в индивидуальном контексте. Родс с соавторами (Rhoads et al., 2021) провели систематический поиск исследований, в которых участники принимали просоциальные решения, и выделили три кластера таких решений, которые они назвали сотрудничеством, справедливостью и альтруизмом. Метаанализ нейровизуализационных данных показал, что каждый тип просоциальных решений задействует разные нейронные системы. В частности, решения о сотрудничестве, в отличие от эгоистичных решений, были связаны с повышенной активацией большого числа областей, включая правую нижнюю лобную извилинку, переднюю поясную кору (ППК), вентральный стриатум, островок, верхнюю височную извилинку, предклинье и затылочные области. Метаанализ большого количества нейровизуализационных исследований в поисках нейронной основы кооперации, общей для всех модальностей, выявил правую височно-теменную связку (ВТС), являющуюся ключевым центром системы теории разума (Prince, Brown, 2022).

Важно отметить, что в большинстве этих исследований использовался массовый одномерный статистический подход к анализу фМРТ-данных. Хотя этот подход позволил сделать множество открытий в области локализации функций мозга и продолжает оставаться наиболее распространенным методом, все большую популярность приобретают методы многомерного анализа паттернов (МАП), которые более чувствительны, чем традиционные методы, и во многих случаях позволяют выявить дифференциальные эффекты там, где последние не справляются (Tsoi et al., 2016). Эти новые методы не только более чувствительны, чем традиционные, но и основаны на радикально иной идеологии. Основное предположение традиционных методов заключается в том, что обработка стимула мозгом отражается в локализованных изменениях нейронной активности и значимыми считаются только те изменения, которые превышают заданный уровень и плотно упакованы в пространственные кластеры заданного размера (Worsley et al., 1996). Это предположение неявно подразумевает функциональную организацию мозга, в котором различные относительно небольшие области реализуют различные относительно узкие когнитивные функции. В отличие от этого, МАП не делает никаких предположений ни об уровне нейронной активности, ни о степени кластеризации этих активаций. Вместо этого предполагается, что содержание психического состояния, связанного с обработкой стимула, «закодировано» в пространственном паттерне нейронной активности и эти паттерны могут быть надежно обнаружены в данных нейровизуализации с помощью инструментов MVPA.

Некоторые многомерные методы, такие как анализ репрезентативного сходства (АРС), позволяют выявить области мозга, участвующие в репрезентации психологических состояний, релевантных задаче (Kriegeskorte et al., 2008). Важным направлением развития АРС является его применение к изучению индивидуальных различий в виде межсубъектного анализа репрезентативного сходства (МС-АРС), который позволяет определить, как индивидуальные различия в реакциях мозга на ситуации связаны с индивидуальными различиями в поведенческих и личностных показателях (Chen et al., 2020; Finn et al., 2020; van Baar et al., 2019).

Действительно, хотя каждый человек может быть вовлечен в сотрудничество или конкуренцию, несомненно, существуют индивидуальные различия в этих типах поведения, которые могут быть связаны с личностными особенностями. Некоторым легче установить отношения сотрудничества, другим склонны к соперничеству. Более того, в силу той роли, которую социальные взаимодействия играют в жизни каждого человека, их успешность или неуспешность могут влиять на субъективное благополучие и психическое здоровье. Наибольшую угрозу для психического здоровья представляет повышенная чувствительность к негативным факторам окружения, которая в рамках пятифакторной модели личности отождествляется с нейротизмом (Goldberg, 1993; Lahey, 2009). Нейротизм, или эмоциональная нестабильность, не только является одним из наиболее заметных доменов личности высшего порядка в различных моделях личности, но и имеет большое значение для здравоохранения (Tackett, Lahey, 2015). Полногеномные исследования ассоциаций показывают его генетическую обусловленность (Kim et al., 2023), а метаанализы нейровизуализационных исследований показывают, что эта обусловленность связана с модуляцией активности мозга (Lin et al., 2023).

В литературе отсутствуют данные о связи нейротизма с индивидуальными различиями в активности мозга в процессе кооперативных и конкурентных взаимодействий, и целью нашей работы было восполнение этого пробела. В качестве экспериментальной парадигмы мы использовали модификацию задачи, описанной в (Decety et al., 2004). Анализ фМРТ-данных проводился как традиционными методами, так и с помощью МС-АРС. Поскольку имеющиеся к настоящему времени данные об активности мозга в процессе кооперативных и конкурентных взаимодействий получены с помощью одномерных методов анализа, результаты которых часто не совпадают с результатами многомерных методов, мы не использовали априорные области интереса и проводили анализ с помощью так называемого прожекторного метода, позволяющего просканировать весь объем мозга и выявить области, в которых индивидуальные различия в динамике

активности достоверно связаны с индивидуальными различиями в личностных показателях. Мы ожидали тем не менее, что эффекты нейротизма выявятся в структурах так называемого социального мозга, а также в центрах регуляции эмоций и внимания.

МЕТОДИКА

Описание выборки

Первоначально в исследовании приняли участие 40 человек. Впоследствии восемь участников были исключены из анализа из-за чрезмерных фМРТ-артефактов или невозможности пройти все четыре экспериментальные сессии, в результате чего осталось 32 участника (из них 16 женщин, средний возраст 23.5 года, $SD = 5.3$). Критериями исключения были серьезные медицинские заболевания, эпилепсия в анамнезе, злоупотребление психоактивными веществами или зависимость от них, а также все противопоказания к МРТ. Исследование соответствовало Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации и было одобрено этическим комитетом Института нейронаук и медицины. Все участники дали письменное информированное согласие на участие в эксперименте.

Стимулы и экспериментальная процедура

В качестве экспериментальной парадигмы мы использовали модификацию парадигмы, описанной в работе Дисити с соавторами (Decety et al., 2004), в которой испытуемые играли в компьютерную онлайн-игру. Игровое поле состояло из сетки 10 x 10. Над сеткой было представлено изображение целевой фигуры из 20 квадратов, форма которой варьировалась и не повторялась в ходе одного и того же эксперимента. Задача испытуемого состояла в том, чтобы построить эту фигуру на экране. Одна игра состояла из 20 попыток (т.е. по одной попытке на каждую клетку мишени). В начале каждой попытки в левой верхней части экрана появлялся квадрат, который участник должен был переместить в нужное место на игровом поле. Для перемещения квадрата использовались два джойстика с двумя кнопками на каждом. Одна кнопка перемещала квадрат на одну позицию влево (левый джойстик) или вправо (правый джойстик), а другая — вверх или вниз соответственно. На перемещение квадрата в каждой попытке давалось пять секунд. Если за это время испытуемый не успевал переместить квадрат в нужное место, то последний фиксировался там, где находился в данный момент. Если в течение 2 секунд никаких действий не предпринималось, квадрат также фиксировался. Между попытками вставлялся двухсекундный интервал. В условии сотрудничества игроки, работающие в паре, должны

были построить одну фигуру. В каждой попытке участник видел движение своего квадрата и квадрата партнера и пытался скоординировать свои действия с действиями партнера таким образом, чтобы поставить квадрат в одно и то же целевое место. В условиях соревнования участники должны были соревноваться с соперником в том, кто быстрее поставит квадрат в нужное место. Ход засчитывался только тому участнику, который первым положил квадрат. В качестве меры успешности использовалась степень завершенности фигуры (т.е. отношение количества заполненных клеток к количеству клеток в целевой фигуре) к концу игры. В одних экспериментах экспериментатор выступал в роли второго игрока, в других — другой испытуемый (оба участника всегда были одного пола и возраста). В сканере изображения игрового поля и стимулов предъявлялись с помощью прямоугольного проекционного экрана с зеркалом. Перед экспериментом испытуемых знакомили с предполагаемым партнером или соперником, который всегда был того же пола, что и испытуемый, и в качестве тренировки проводили по 20 проб каждого типа игры. Во время игры партнер/соперник находился в другом помещении. Для каждого участника эксперимент состоял из четырех сеансов сканирования, каждый из которых включал все три вида игры (индивидуальная, сотрудничество и соревнование), с двухминутным отдыхом между сеансами. Каждый вид игры включал 20 попыток по 5 секунд каждая с интервалом в 2 секунды. Задержка между началом предстоящего кадра фМРТ и началом предъявления стимула варьировалась случайным образом между интервалами 100 и 2350 мс. На рис. 1 представлен временной ход одного сеанса фМРТ. Каждая из четырех сессий состояла из трех экспериментальных условий (соревнование, индивидуальная игра и сотрудничество). Каждое условие начиналось с инструкции (10 с) и включало 20 испытаний, по 5 с каждое, с межпробным интервалом 2 с. Каждая игра начиналась с демонстрации экрана, на котором были представлены игровое поле, фигура-мишень и инструкция по типу предстоящей игры (например, «в этой игре вы должны построить фигуру-мишень индивидуально» или «в сотрудничестве/соревновании с другим игроком»). Порядок видов игры в каждой сессии был псевдорандомизирован. Для выявления эффектов личностных переменных использовался опросник «Маркеры факторов большой пятёрки» (Big Five Factor Markers), который ранее был нами переведен и адаптирован (Князев с соавт., 2010). В данном исследовании использовалась шкала нейротизма из этого опросника.

Запись и анализ фМРТ-данных

фМРТ-данные были получены с помощью последовательности EPI на сканере Philips Ingenia 7FN8GDI 3.0 T. Первые пять сканов в начале

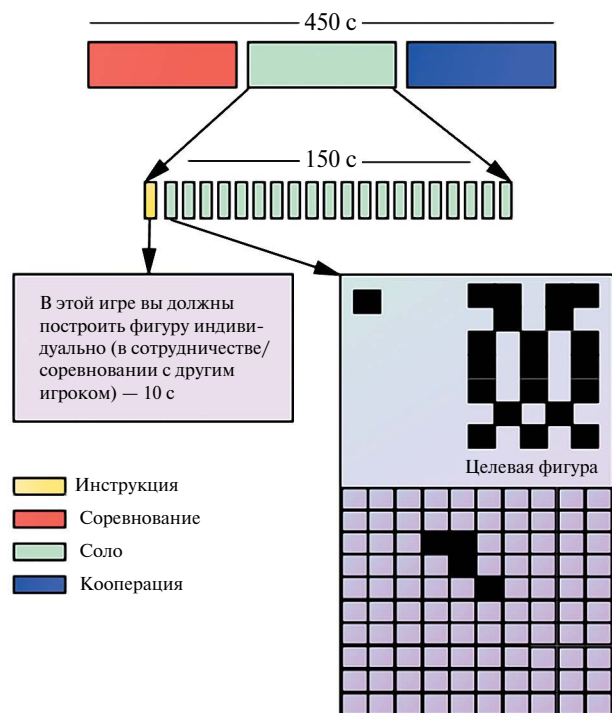


Рис. 1. Временной ход одного сеанса фМРТ. Каждая из четырех сессий состояла из трех экспериментальных условий (соревнование, индивидуальная игра и сотрудничество). Каждое условие начиналось с инструкции (10 с) и включало 20 проб, по 5 с каждая, с межпробным интервалом 2 с.

Fig. 1. Time course of one fMRI session. Each of the four sessions consisted of three experimental conditions (competition, solo, and cooperation). Each condition began with an instruction (10 s) and included 20 trials, 5 s each, with an inter-trial interval of 2 s.

каждого сеанса отбрасывались для обеспечения эффекта эквипирации сканера ($TR = 2$ с, $TE = 35$ мс, flip angle = 90° , $FOV = 100$, матрица 96×94 , 25 срезов толщиной 5 мм, без зазора). T1-взвешенные структурные сканы высокого разрешения (1 мм) были получены с помощью последовательности 3D MP-GR ($TR = 7.8$ мс, $TE = 3.76$ мс, матрица 252×227).

Предварительная обработка проводилась с помощью инструментария SPM-12 и включала коррекцию времени получения каждого среза (slice-time correction), выравнивание (realignment) с помощью трансформации по принципу «жесткого тела» (rigid body transformation), корегистрацию и нормализацию к шаблону Монреальского неврологического института (MNI), повторный сэмплинг (resampling) до разрешения $2 \times 2 \times 2$ мм и сглаживание (full-width half-maximum, 4 мм). Мы проверяли параметры движения, и порог для качества изображений был установлен на уровне 2 мм для трех плоскостей трансформации. Все участники, которые превысили этот

порог движения, были исключены из последующего анализа (всего было исключено восемь участников из первоначальной выборки 40 испытуемых).

Поскольку методы многомерного анализа чувствительны к соотношению сигнал/шум (Dimsdale-Zucker, Ranganath, 2018), мы дополнительно обесшумливали данные с помощью программы GLMsingle, позволяющей точно измерять отдельные фМРТ-ответы (Prince et al., 2022). Для этого была построена матрица дизайна с отдельными регрессорами для каждого предъявления стимула (5 с от появления на экране стимула до окончания пробы) и шестью помеховыми регрессорами движения головы (x, y, z, крен, шаг и рысканье), и для каждого вокселя была выбрана индивидуальная функция гемодинамического отклика из библиотеки функций-кандидатов. С помощью перекрестной валидации был получен набор шумовых регрессоров из не связанных с экспериментом вокселей, и, наконец, бета-коэффициенты были регуляризованы по вокселю с помощью гребневой регрессии (Prince et al., 2022). Полученные в результате трехмерные образы весовых бета-коэффициентов использовались в последующем анализе.

Одномерный GLM-анализ проводился с помощью пакета инструментов SPM-12. Обесшумленные бета-коэффициенты были усреднены по пробам и сессиям для каждого испытуемого отдельно, дополнительно сглажены (full-width half-maximum 8 мм) и использованы для анализа второго уровня, в котором выявлялся главный эффект фактора «Вид игры», а также эффект нейротизма. Оценки нейротизма вводились в регрессионную матрицу в качестве ковариата. Достоверность эффектов оценивалась при пороге на уровне вокселей $p < 0.001$ и на уровне кластеров $p < 0.05$, с FWE-поправкой на множественные сравнения.

МАП проводился с использованием инструментария CoSMoMVPA (<http://www.cosmommvpa.org/>) (Oosterhof et al., 2016) в среде Matlab. При проведении MC-APC мы использовали проекторный метод для выявления областей мозга, в которых межсубъектное сходство во временной динамике нейронной активности коррелирует со сходством в ответах на вопросы шкалы нейротизма. У каждого испытуемого для каждого вокселя объема мозга определялась сферическая окрестность, включающая 200 ближайших к нему вокселей, и путем усреднения сигнала по всем вокселям в этом объеме выделялась временная динамика активности в течение соответствующего вида игры (4 сессии \times 20 проб). Далее для каждого объема и каждой пары испытуемых рассчитывалось нейронное сходство как корреляция Пирсона между временной динамикой активности, и полученное значение приписывалось центральному вокселю проекторной сферы. Для личностной переменной матрица межсубъектного сходства рассчитывалась на основе корреляции

Спирмена между ответами на соответствующие пункты шкалы нейротизма (Finn et al., 2020). Степень похожести матрицы нейронного сходства каждого прожектора с матрицей сходства личностной переменной рассчитывалась по ранговой корреляции Спирмена между верхними треугольниками этих матриц. Результаты прожекторного анализа МС-АРС были протестированы на 1000 суррогатных наборов данных. В каждом из этих наборов были рассчитаны корреляции Спирмена между целевой матрицей межсубъектного сходства по шкале нейротизма и матрицей нейронного сходства каждого прожекторного объема после рандомизации строк и столбцов целевой матрицы. Эти данные использовались для проверки значимости выявленных корреляций (Smith, Nichols, 2009). Учитывались только положительные корреляции, а пороговыми считались значения $z > 2.24$ ($p_{\text{corr}} < 0.0125$).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Поведенческие данные

На рис. 2 представлен скрипичный график, показывающий распределение баллов по шкале нейротизма в выборке. Среднее значение было 27.1 ($SD = 9.1$). В нормативной выборке (Князев с соавт., 2010) использовалась версия опросника, в которой каждая шкала была представлена 20 пунктами, и в выборке преобладали женщины (66%). Среднее значение по шкале нейротизма в этой выборке было 64.8. В версии, использованной в данной работе, каждая шкала представлена 10 пунктами и мужчины и женщины представлены в выборке поровну. При

пересчете нормативных данных с учетом этих факторов значение нейротизма в данной выборке не отличается от нормативного.

Анализ поведенческих данных методом ANOVA для повторных измерений с фактором типа игры (индивидуальная, кооперативная, соревновательная) и степенью завершенности фигуры к концу задания в качестве зависимой переменной показал значимый главный эффект типа игры ($F = 109.3$, $p < 0.001$). Степень завершенности фигуры была наибольшей при индивидуальном выполнении задания и наименьшей при соревновании. В условиях одиночной игры большинство участников смогли завершить фигуру за отведенное время во всех сессиях. В силу отсутствия заметной межиндивидуальной вариации поведенческих показателей в процессе индивидуальной игры она была исключена из последующего анализа.

Использование шкалы нейротизма в качестве ковариата в этом анализе не выявило достоверного эффекта. Аналогичный анализ с использованием в качестве зависимой переменной среднего времени завершения фигуры (в тех играх, где фигуру удалось завершить) также выявил значимый главный эффект типа игры ($F = 84.4$, $p < 0.001$). Время было наименьшим при конкуренции и наибольшим при кооперации. Использование шкалы нейротизма в качестве ковариата в этом случае выявило близкий к достоверности эффект ($p = 0.07$). Хотя испытуемым с высоким нейротизмом требовалось больше времени для завершения фигуры во всех видах игры, разница была наибольшей в условиях кооперации. Соответственно нейротизм коррелировал со временем, потребовавшимся для завершения целевой фигуры при кооперативной игре ($r = 0.41$, $p = 0.019$).

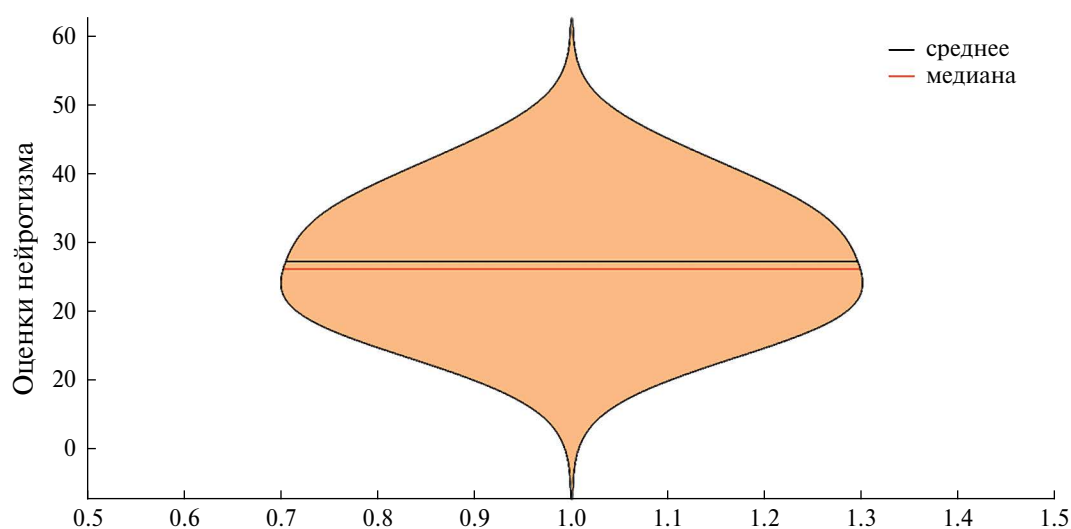


Рис. 2. Скрипичный график, показывающий распределение баллов по шкале нейротизма в выборке.

Fig. 2. Violin plot showing the distribution of neuroticism scores in the sample.

фМРТ-данные, одномерный GLM-анализ

Главный эффект фактора «Вид игры» был значим в кластере с центром в клиновидной коре ($x = 0$, $y = -78$, $z = 24$; $KE = 1741$; $P_{FWE-CORR} < 0.001$)

(рис. 3). Как показано на рис. 1 (б), в этом кластере наблюдается деактивация, минимальная в условиях одиночной игры и максимальная в условиях соревнования. Введение шкалы нейротизма в качестве ковариата не выявило достоверного эффекта

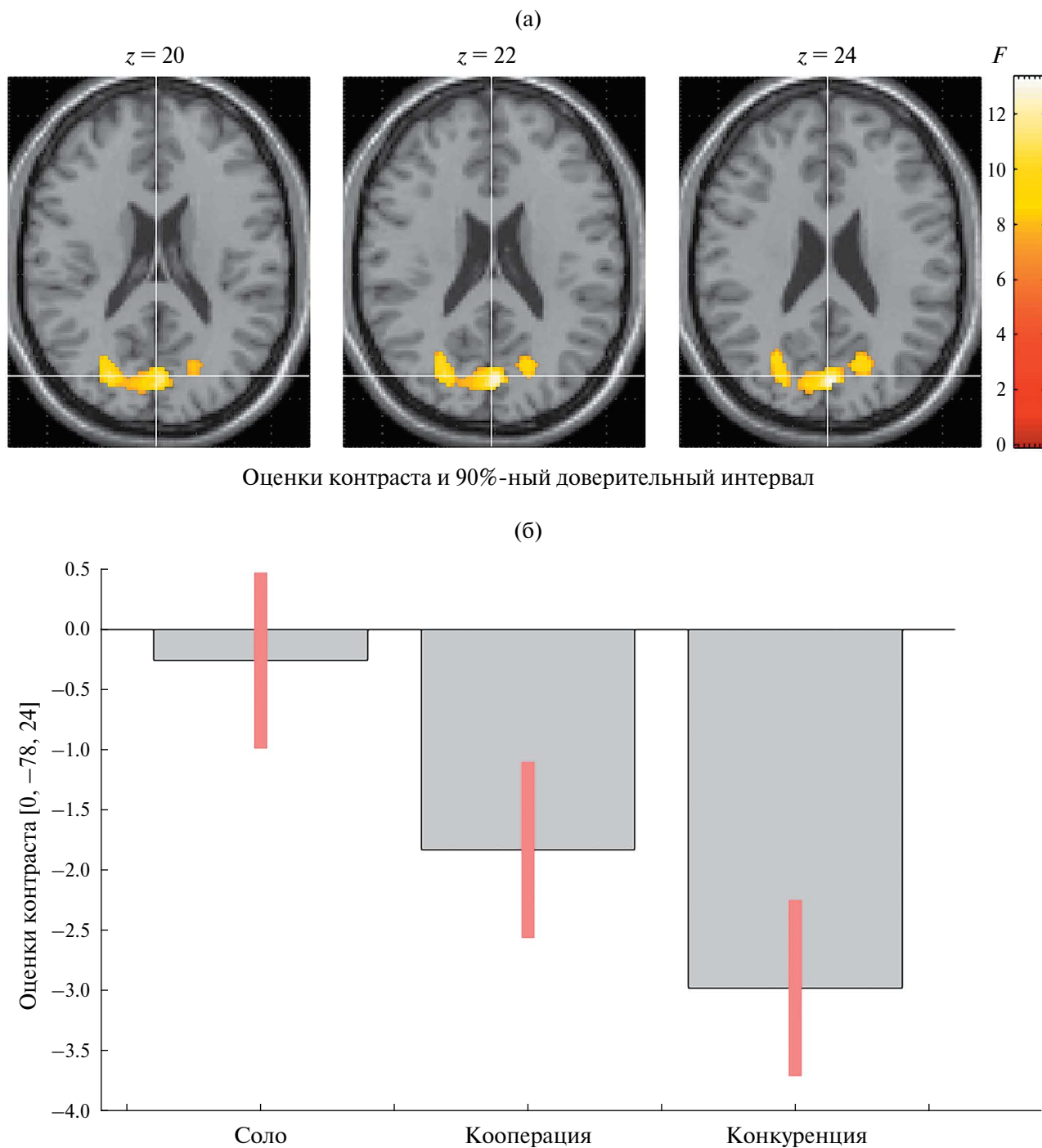


Рис. 3. Одномерный анализ фМРТ-данных. Главный эффект фактора «Вид игры». (а) — локализация значимого кластера. (б) — оценки контраста для трех уровней фактора.

Fig. 3. Univariate analysis of fMRI data. Main effect of the game type factor. (a) — localization of the significant cluster. (б) — contrast estimates for the three levels of the factor.

при использовании строгих порогов достоверности ($p < 0.001$ на уровне вокселя и $p < 0.05$ на уровне кластера). При использовании более либерального порога на уровне вокселя ($p < 0.01$) нейротизм коррелировал с активацией левого островка при кооперативной игре ($x = -44, y = -24, z = 22, k = 1858, T = 3.35, \text{cluster } p = 0.013, \text{FWE-corrected}$).

Межсубъектный анализ сходства репрезентаций

В условиях конкуренции значимые корреляции между матрицами межсубъектного сходства временной динамики нейронной активности и межсубъектного сходства ответов на вопросы шкалы нейротизма выявлены в большом количестве областей мозга, включая переднюю и заднюю части поясной извилины, медиальную префронтальную кору, предклинье, правую среднюю и нижнюю лобные извилины, правую височно-теменную связку, а также области двигательной и зрительной коры (рис. 4). В условиях кооперации значимые корреляции с нейротизмом выявлены в ОФК, правой нижней и верхней лобных извилинах, а также в островке, веретенообразной извилине и правой средней височной извилине (рис. 5).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ поведенческих данных показывает, что задание было понятно участникам и вполне выполнимо в одиночном режиме. Трудности с выполнением заданий в двух других условиях отражают

трудности координации с партнером или конкуренции с соперником. Последнее задание является наиболее сложным, о чем свидетельствует самый низкий средний процент выполнения. С другой стороны, в тех случаях, когда заданную фигуру удавалось построить до конца, это происходило быстрее всего в условиях конкуренции. Очевидно, что в этих условиях участники стремились работать как можно быстрее и совершали больше ошибок. Участники с высокими оценками по шкале нейротизма в целом работали медленнее, и, очевидно, наибольшую трудность для них представляла координация усилий с партнером в условиях кооперации, о чем говорит корреляция нейротизма со временем, потребовавшимся для завершения целевой фигуры при кооперативной игре.

Одномерный GLM-анализ выявил деактивацию в затылочной области коры, которая отсутствовала в условиях одиночной игры и была максимальной в условиях соревнования. Локализация кластера перекрывается с задним центром сети режима по умолчанию (DMN, Raichle et al., 2001). Задний центр DMN является наиболее активной областью мозга в состоянии покоя (Raichle, Snyder, 2007), и степень его деактивации во время выполнения задачи пропорциональна сложности задачи (McKiernan et al., 2006; Singh, Fawcett, 2008). Таким образом, полученные нами результаты GLM согласуются с поведенческими данными, показывающими, что для большинства участников сложность задачи возрастает от одиночного режима через кооперацию к соревновательному режиму. Для испытуемых с высоким уровнем нейротизма, однако,

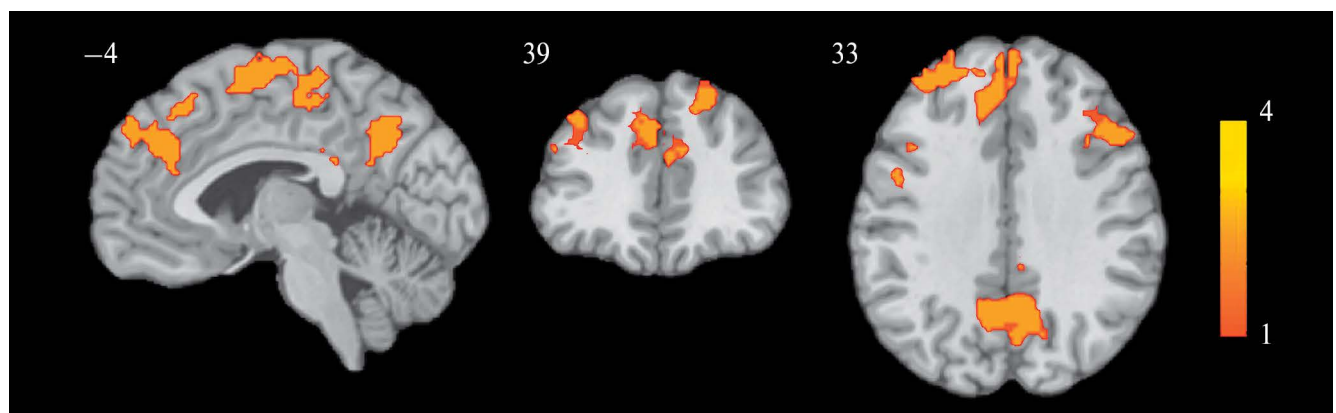


Рис. 4. Результаты прожекторного анализа репрезентативного сходства, показывающие области мозга, в которых межсубъектные корреляции временной динамики ответов во время конкурентной игры коррелировали с межсубъектным сходством ответов на вопросы шкалы нейротизма. Цветами обозначены значения z , полученные при сравнении истинных корреляций с нулевым распределением, рассчитанным по 1000 суррогатных наборов данных, при пороговом значении $z > 2.24$ ($p_{\text{corr}} < 0.0125$).

Fig. 4. Results of a searchlight representative similarity analysis showing brain regions in which inter-subject correlations of temporal dynamics of neural responses during competitive play correlated with inter-subject similarity of responses to items of the neuroticism scale. Colors indicate z values obtained by comparing the true correlations to the null distribution calculated from 1000 surrogate datasets, with a threshold value of $z > 2.24$ ($p_{\text{corr}} < 0.0125$).

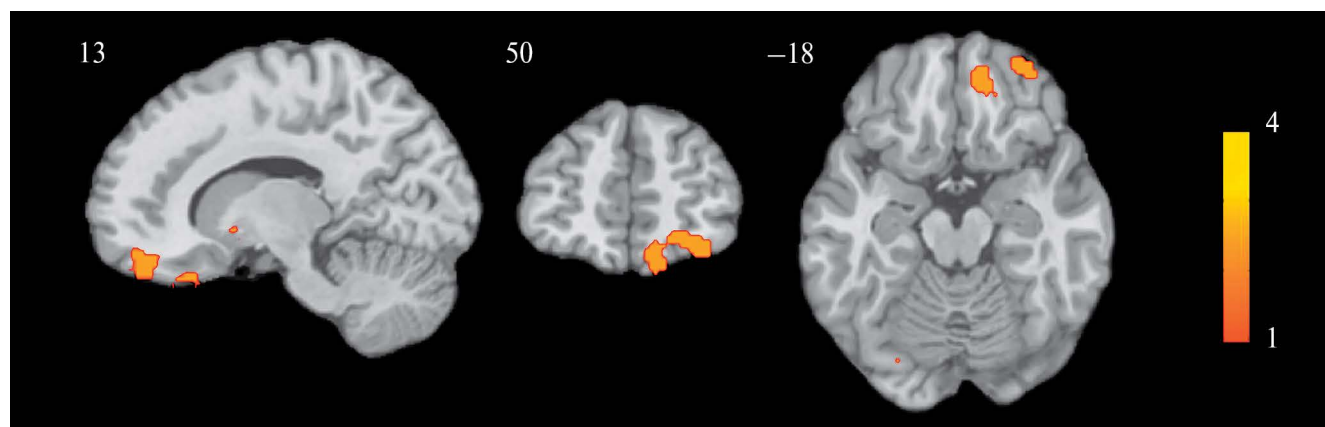


Рис. 5. Результаты прожекторного анализа репрезентативного сходства, показывающие области мозга, в которых межсубъектные корреляции временной динамики ответов во время кооперативной игры коррелировали с межсубъектным сходством ответов на вопросы шкалы нейротизма. Цветами обозначены значения z , полученные при сравнении истинных корреляций с нулевым распределением, рассчитанным по 1000 суррогатных наборов данных, при пороговом значении $z > 2.24$ ($p_{\text{corr}} < 0.0125$).

Fig. 5. Results of a searchlight representative similarity analysis showing brain regions in which inter-subject correlations of temporal dynamics of neural responses during cooperative play correlated with inter-subject similarity of responses to items of the neuroticism scale. Colors indicate z values obtained by comparing the true correlations to the null distribution calculated from 1000 surrogate datasets, with a threshold value of $z > 2.24$ ($p_{\text{corr}} < 0.0125$).

координация усилий с партнером в условиях кооперации может представлять трудность. Об этом говорят не только рассмотренные выше поведенческие данные, но и выявленная в условиях кооперации корреляция нейротизма с активацией островка, который, как известно, является главным корковым центром, реагирующим на стресс (Holtmann et al., 2022).

Анализ межсубъектного сходства репрезентаций в условиях кооперации выявил связь нейротизма с динамикой активности мозга в центрах, связанных с регуляцией эмоций, включая островок, ОФК и правую среднюю височную извилину. Активацию ОФК в условиях кооперации связывают с тем, что этот вид взаимодействий является социально желательным (Decety et al., 2004). Хотя МС-АРС не позволяет судить о связи нейротизма с большей или меньшей активацией ОФК в условиях кооперации, он показывает, что индивидуальная вариация динамики этой активации связана с нейротизмом.

В условиях конкуренции нейротизм коррелировал с динамикой активности большого количества областей мозга, включая все основные центры DMN (передняя и задняя части поясной извилины, медиальная префронтальная кора, предклинье, височно-теменная связка), центры регуляции внимания (средняя и нижняя лобные извилины), а также области двигательной и зрительной коры. Можно думать, что этот набор включает большинство областей мозга, участвующих в выполнении задания. То, что индивидуальная вариация динамики активности всех этих областей связана с вариацией оценок нейротизма, показывает, что

предрасположенность к эмоциональной нестабильности в значительной степени определяет степень привлечения когнитивных ресурсов в условиях конкуренции.

В целом, проведенный нами анализ показывает, что у предрасположенных к эмоциональной нестабильности людей социальные взаимодействия, как в контексте кооперации, так и в контексте конкуренции, связаны с большим напряжением, проявляющимся в активности центров социального мозга, регуляции эмоций и внимания. Это потенциально может приводить к накоплению последствий социального стресса и появлению симптомов отклонений психического здоровья.

ВЫВОДЫ

1. Для индивидов с высоким уровнем нейротизма координация усилий с партнером в условиях кооперации может представлять трудность. Об этом говорят и поведенческие (корреляция нейротизма со временем завершения фигуры), и нейровизуализационные данные (связь нейротизма с динамикой активности мозга в центрах регуляции стресса и эмоций).

2. У индивидов с высоким нейротизмом в условиях конкуренции центры социального мозга, регуляции внимания, а также двигательной и зрительной коры задействованы в большей степени.

3. У предрасположенных к эмоциональной нестабильности людей социальные взаимодействия, как в контексте кооперации, так и в контексте

конкуренции, связаны с большим напряжением, проявляющимся в активности центров социального мозга, регуляции эмоций и внимания. Это потенциально может приводить к накоплению последствий социального стресса и появлению симптомов отклонений психического здоровья.

ИНФОРМАЦИЯ О ВКЛАДЕ КАЖДОГО АВТОРА

Г.Г. Князев — концепция общее руководство работой, анализ данных, написание черновика статьи; А.Н. Савостьянов — руководство сбором данных, обсуждение результатов исследования, редактирование текста статьи; А.В. Бочаров — участие в сборе данных, обсуждение результатов исследования, редактирование текста статьи; А.Е. Сапрыгин — участие в сборе данных, предварительный анализ данных, обсуждение результатов исследования, редактирование текста статьи.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-15-00142).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Дмитриенко Надежде Васильевне за помощь в сборе данных.

УКАЗАНИЕ НА ОТСУТСТВИЕ ИЛИ НАЛИЧИЕ КОНФЛИКТА ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Исследование соответствовало Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации и было одобрено этическим комитетом Института нейронаук и медицины (приказ № 133 от 17.06.2021). Все участники дали письменное информированное согласие на участие в эксперименте.

УКАЗАНИЕ НА ДОСТУПНОСТЬ ПЕРВИЧНЫХ ДАННЫХ

Данные могут быть предоставлены по обоснованному запросу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Князев Г.Г., Митрофанова Л.Г., Бочаров В.А. Валидизация русской версии маркеров факторов большой пятерки из международного пула личностных вопросов Гольдберга. Психологический журнал. 2010. 31:100–110.
- Chen P.H.A., Jolly E., Cheong J.H., Chang L.J. Intersubject representational similarity analysis reveals individual variations in affective experience when watching erotic movies. *NeuroImage*. 2020. 216:116851.
- Decety J., Jackson P.L., Sommerville J.A., Chaminade T., Meltzoff A.N. The neural bases of cooperation and competition: an fMRI investigation. *Neuroimage*. 2004. 23:744–751.
- Dimsdale-Zucker H.R., Ranganath C. Representational similarity analyses: a practical guide for functional MRI applications. In *Handbook of behavioral neuroscience* (Vol. 28, pp. 509–525). 2018. Elsevier.
- Dunbar R.I.M. The social brain: mind, language, and society in evolutionary perspective. *Annu. Rev. Anthropol.* 2003. 32:163–181.
- Finn E.S., Glerean E., Khojandi A.Y., Nielson D., Molfese P.J., Handwerker D.A., Bandettini P.A. Idiosynchrony: From shared responses to individual differences during naturalistic neuroimaging. *NeuroImage*. 2020. 215:116828.
- Goldberg L.R. The development of markers for the Big-Five factor structure. *Psychological Assessment*. 1992. 4:26–42.
- Goldberg L.R. The structure of phenotypic personality traits. *American psychologist*. 1993. 48:26.
- Holtmann O., Franz M., Moenig C., Tenberge J.G., Schloßmacher I., Ivanova I., Preul C., Schwindt W., Melzer N., Miltner W.H.R., Straube T. Lateralized deficits in arousal processing after insula lesions: behavioral and autonomic evidence. *Cortex*. 2022. 148:168–179.
- Kim Y., Saunders G.R., Giannelis A., Willoughby E.A., DeYoung C.G., Lee J.J. Genetic and neural bases of the neuroticism general factor. *Biol. Psychol.* 2023. 184:108692.
- Kriegeskorte N., Mur M., Bandettini P. Representational similarity analysis — connecting the branches of systems neuroscience. *Front. Syst. Neurosci.* 2008. 2:4.
- Lahey B.B. Public health significance of neuroticism. *American Psychologist*. 2009. 64:241.
- Lee M., Ahn H. S., Kwon S. K., Kim S. I. Cooperative and competitive contextual effects on social cognitive and empathic neural responses. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2018. 12:218.
- Lin J., Li L., Pan N., Liu X., Zhang X., Suo X., Kemp G.J., Wang S., Gong Q. Neural correlates of neuroticism: a coordinate-based meta-analysis of resting-state functional brain imaging studies. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2023. 146:105055.
- McKiernan K.A., D'Angelo B.R., Kaufman J.N., Binder J.R. Interrupting the 'stream of consciousness': an fMRI investigation. *NeuroImage*. 2006. 29:1185–1191.

- Oosterhof N.N., Connolly A.C., Haxby J.V. CoSMoMVPA: multi-modal multivariate pattern analysis of neuroimaging data in Matlab/GNU Octave. *Frontiers in neuroinformatics*. 2016. 10:27.
- Polosan M., Baciú M., Cousin E., Perrone M., Pichat C., Bougerol T. An fMRI study of the social competition in healthy subjects. *Brain and cognition*. 2011. 77: 401–411.
- Prince K., Brown S. Neural correlates of partnered interaction as revealed by cross-domain ALE meta-analysis. *Psychology & Neuroscience*. 2022. 15:1.
- Prince J.S., Charest I., Kurzawski J.W., Pyles J.A., Tarr M.J., Kay K.N. Improving the accuracy of single-trial fMRI response estimates using GLMsingle. *Elife*. 2022. 11:e77599.
- Raichle M.E., MacLeod A.M., Snyder A.Z., Powers W.J., Gusnard D.A., Shulman G.L. A default mode of brain function. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2001. 98:676–682.
- Raichle M.E., Snyder A.Z. A default mode of brain function: a brief history of an evolving idea. *Neuroimage*. 2007. 37:1083–1090.
- Rhoads S.A., Cutler J., Marsh A.A. A feature-based network analysis and fMRI meta-analysis reveal three distinct types of prosocial decisions. *Social cognitive and affective neuroscience*. 2021. 16:1214–1233.
- Singh K.D., Fawcett I.P. Transient and linearly graded deactivation of the human default-mode network by a visual detection task. *NeuroImage*. 2008. 41:100–112.
- Smith S.M., Nichols T.E. Threshold-free cluster enhancement: Addressing problems of smoothing, threshold dependence and localisation in cluster inference. *NeuroImage*. 2009. 44:83–98.
- Tackett J.L., Lahey B.B. Neuroticism. *The Oxford Handbook of the Five Factor Model*. Oxford Academic. 2015. 39–56.
- Tsoi L., Dungan J., Waytz A., Young L. Distinct neural patterns of social cognition for cooperation versus competition. *NeuroImage*. 2016. 137:86–96.
- van Baar J.M., Chang L.J., Sanfey A.G. The computational and neural substrates of moral strategies in social decision-making. *Nature communications*. 2019. 10:1483.
- Worsley K.J., Marrett S., Neelin P., Vandal A.C., Friston K.J., Evans A.C. A unified statistical approach or determining significant signals in images of cerebral activation. *Hum. Brain Mapp.* 1996. 4:58–73.

THE RELATIONSHIP OF NEUROTICISM TO INDIVIDUAL DIFFERENCES IN THE DYNAMICS OF BRAIN ACTIVITY DURING SOCIAL INTERACTIONS

G. G. Knyazev^{a, #}, A. N. Savostyanov^{a, b, c}, A. V. Bocharov^{a, b}, A. E. Saprigyn^a

^a*Federal State Budgetary Scientific Institution “Scientific Research Institute of Neurosciences and Medicine”,
Novosibirsk, Russia*

^b*Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia*

^c*Federal Research Center Institute of Cytology and Genetics, SB RAS Novosibirsk, Russia*

[#]*e-mail: knyazev@physiol.ru*

Social interactions in the context of cooperation and competition are the most important type of activity of people, determining their well-being and success in life. The neural bases of this activity, as well as the role of personality-related individual differences, are insufficiently studied. In particular, the literature lacks data on the relationship between neuroticism and individual differences in brain activity during cooperative and competitive interactions, and the aim of our work was to fill this gap. fMRI data were recorded during task performance in individual, cooperative, and competitive modes and analyzed using the inter-subject representative similarity analysis. The results indicate that in emotionally instable individuals, social interactions, in both cooperative and competitive contexts, are associated with greater strain, manifested in the activity of social brain, emotion regulation, and attentional centers. This can potentially lead to the accumulation of the effects of social stress and the emergence of symptoms of mental health problems.

Keywords: social interactions, cooperation, competition, fMRI, representational similarity analysis, multivariate pattern analysis