

АКТИВНОСТЬ ЛЕВОЙ НИЖНЕЙ ЛОБНОЙ ИЗВИЛИНЫ И МЕХАНИЗМ ДЕТЕКЦИИ ОШИБОК ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ЛОЖНЫХ ДЕЙСТВИЙ В УСЛОВИЯХ РАЗЛИЧНОЙ МОНЕТАРНОЙ ВЫГОДЫ

© 2024 г. А. Д. Коротков^{1,*}, М. А. Желтякова¹, Р. С. Машарипов¹, М. Д. Дидур¹,
Д. В. Чередниченко¹, М. В. Киреев^{1,2}

¹ФБГУН Институт мозга человека им. Н.П. Бехтерева Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: korotkov@ihb.spb.ru

Поступила в редакцию 28.10.2023 г.

После доработки 01.12.2023 г.

Принята к публикации 01.12.2023 г.

Настоящее исследование посвящено изучению характеристик активности зон мозга, вовлекаемых в обеспечение процессов управления действиями и испытывающих модулирующее влияние со стороны механизма детекции ошибок в условиях различной потенциальной монетарной выгоды манипулятивных правдивых и ложных действий. Показано, что реализация потенциально менее выгодных ложных действий характеризуется относительно большим уровнем функциональной активности структуры, получающей информацию от структур мозга, связанных с обеспечением детекции ошибок, — левой нижней лобной извилины. Данный эффект выявлен для экспериментальных условий с менее подкрепляемыми ложными действиями как по сравнению с относительно более вознаграждаемой ложью, так и с манипулятивными правдивыми действиями вне зависимости от характера их поощрения. Более того, повышение выгоды ложных действий сопровождается исчезновением статистически значимой разницы в активности вендролатеральной префронтальной коры, которая наблюдалась в сравнении одинаково низковыгодных правдивых и ложных действий. Полученный результат указывает на возможный механизм влияния ожидаемой монетарной выгоды на принятие манипулятивного решения солгать, в соответствии с которым префронтальные структуры, обеспечивающие управление поведением, демонстрируют относительно меньшую восприимчивость к вовлечению детектора ошибок в обеспечение ложных действий.

Ключевые слова: детектор ошибок, монетарная выгода, префронтальная кора

DOI: 10.31857/S0044467724020081

ВВЕДЕНИЕ

Изучение мозговых механизмов реализации сознательных ложных действий получило существенное развитие в последние годы в связи с применением т.н. экологической исследовательской парадигмы, предполагающей свободное принятие испытуемым самостоятельного решения — солгать или нет. Развитие данного направления исследований позволило экспериментально учитывать известный аспект социальных взаимодействий человека, в соответствии с которым средством достижения цели при манипулятивных действиях может служить не только ложь, но и манипулятивное использование правды. Такой подход позволил выявить участие в обеспечении манипулятивных действий структур мозга, входящих в состав универсальной (т.е. участвующей в обеспечении широкого спектра видов деятельности) лобно-теменной нейро-

нальной системы (Abe et al., 2006; Christ et al., 2009; Ito et al., 2011; Kireev et al., 2013). На основании данных об особенностях функционального состояния структур лобно-теменной системы и функциональных взаимодействий между ними при ложных действиях, сформировано доминирующее в современной литературе представление о том, что ложное действие предполагает торможение автоматизированного, “дефолтного” правдивого действия, что проявляется дополнительной (относительно правдивого действия) активацией участвующих в обеспечении когнитивного контроля структур префронтальной коры (Abe et al., 2006; Christ et al., 2009; Kireev et al., 2013). Именно с торможением конкурирующей доминантной реакции, т.е. правдивого ответа при реализации ложных действий, ассоциируют функции левой вендролатеральной префронтальной коры (далее — левой нижней лобной извилины) (Miller, Cohen, 2001). Это соответствует

классическим представлениям о нисходящем (top-down) механизме торможения действий, который обеспечивается фронто-стриарной системой мозга (Hannah, Aron, 2021; Morein-Zamir, Robbins, 2015). Считается, что области лобной коры (нижняя лобная извилина и пре-дополнительная моторная кора) инициируют тормозное влияние и усиливают тормозные эфферентные влияния базальных ганглий на моторные ядра таламуса. Результатом является снижение активации моторных областей коры и снижение вероятности совершить некорректное действие (реализация доминантного правдивого ответа).

Однако ранее, при изучении функциональных взаимовлияний между структурами фронто-стриарной системы мозга с помощью динамического причинно-следственного моделирования, было установлено, что при манипулятивных ложных действиях усиливается воздействие хвостатых ядер на области латеральной префронтальной коры, включая левую нижнюю лобную извилину (Киреев и др., 2018). При этом установленный восходящий характер взаимовлияний на области префронтальной коры при реализации ложных действий подтверждает гипотезу о ведущей роли мозгового механизма детекции ошибок (ДО, (Kireev et al., 2013; Киреев и др., 2015)), мониторинга конфликта и когнитивного контроля в реализации ложных действий (Wu et al., 2022). Известно, что мозговой механизм ДО является механизмом оптимизации деятельности (Bechtereva et al., 2005, 1991; Bechtereva, Gretchin, 1969), а не ее непосредственного управления. Сигнал ДО не вызывает автоматического прекращения “некорректной” деятельности, т.е. механизм ДО не блокирует ошибочные действия. ДО сигнализирует о “непорядке”, что является важным компонентом вовлечения процессов когнитивного контроля, направленных на работу с выявленным “непорядком”. Более того, согласно модели мониторинга конфликта, сигнал ДО может отражать не столько сигнал об ошибке, сколько сигнал об обнаружении конфликта, связанного с наличием нескольких конкурирующих вариантов ответа (Botvinick et al., 2001; Yeung et al., 2004). В рамках данных предположений вовлечение областей, обеспечивающих обнаружение конфликта или ошибки (задняя и передняя поясная кора (Cieslik et al., 2023; Fu et al., 2022)), оказывает восходящее модулирующее влияние на области латеральной префронтальной коры (MacDonald et al., 2000; Masina et al., 2019), связанные с процессом разрешения конфликта (выбор между двумя дей-

ствиями). По данным фМРТ, данное влияние на нейрофизиологическом уровне проявляется как усиление функциональных взаимодействий между указанными областями мозга.

Исходя из этих представлений и как было показано в наших предыдущих исследованиях, оптимизирующая роль ДО в условиях ложных действий проявляется модулирующим влиянием хвостатых ядер на активность нижней лобной извилины левого полушария (Киреев и др., 2018). Вместе с тем остается открытым вопрос о влиянии размера материальной выгоды на характер взаимодействия между этими звеньями систем управления поведением и ДО. Известно, что увеличение размера материальной выгоды может сопровождаться увеличением количества ложных действий (Zhou et al., 2014). Также в игре с монетарным вознаграждением за победу испытуемые с большей вероятностью лгут после поражения, чем после победы (Sun et al., 2017). При исследовании нейрональных коррелятов выбора между вариантами денежного вознаграждения, которые варьировались в зависимости от времени ожидания его получения, McClure и соавт. (McClure et al., 2004) показали участие двух отдельных нейроанатомических систем. А именно, звенья лимбической системы активируются решениями, предполагающими немедленно доступные вознаграждения. Напротив, области латеральной префронтальной коры и задней теменной коры вовлекаются вне зависимости от времени получения вознаграждения, что указывает на преимущественное влияние размера материальной выгоды. Судя по вышеописанным литературным данным, нижняя лобная извилина левого полушария, с одной стороны, является “мишенью” для модулирующего влияния ДО, а с другой – чувствительна к выгодности действий, что указывает на важную роль этой структуры в обеспечении процессов управления поведением. Однако остается неясным, как именно повышение выгодности действия сказывается на характеристиках активности в нижней лобной извилине левого полушария, которая испытывает влияние со стороны механизма ДО, срабатывающего на ложь как на некорректное действие.

Опираясь на вышесказанное, можно предположить, что при увеличении монетарной выгоды информация от ДО при ложных действиях будет учитываться в меньшей степени, что будет сопровождаться меньшим уровнем активности в левой нижней лобной извилине. Учитывая, что фактор монетарной выгоды может способ-

ствовать формированию мотивации реализовать ложное действие (Cannito et al., 2023; Gino, Pierce, 2009; Kouchaki et al., 2013), принять решение о реализации выгодного действия может быть относительно проще, чем о реализации менее выгодного, хоть оно и характеризуется срабатыванием ДО. В конечном итоге ожидается, что на процесс принятия решения и реализацию действий вовлечение ДО будет оказывать относительно меньшее влияние в условиях более высокого вознаграждения. Следовательно, в менее выгодных условиях такая мотивация будет относительно снижена, а значит, принятие решения и реализация относительно маловыгодного действия, при сигнализации от ДО, будет требовать больших ресурсов. Если такие рассуждения корректны, то на нейрофизиологическом уровне можно ожидать повышенную активность левой нижней лобной извилины в условиях относительно маловыгодных действий. В связи с этим настоящее исследование посвящено изучению функциональной активности левой нижней лобной извилины в условиях различной потенциальной монетарной выгоды ложных действий как префронтального звена фронто-стриарной системы, вовлечение которой в их обеспечение было продемонстрировано нами ранее.

МЕТОДИКА

Испытуемые

Для проверки гипотезы исследования были использованы данные функциональной МРТ (фМРТ), полученные у 24 здоровых праворуких испытуемых (14 женщин и 10 мужчин) в возрасте 19–44 лет (26.4 ± 5.3 лет). Праворукость оценивалась по вопроснику Олдфилда (Oldfield, 1971). Проведение исследования было одобрено Комитетом по этике Института мозга человека им. Н.П. Бехтерева Российской академии наук. Все участники исследования подписали информированное согласие на участие в исследовании.

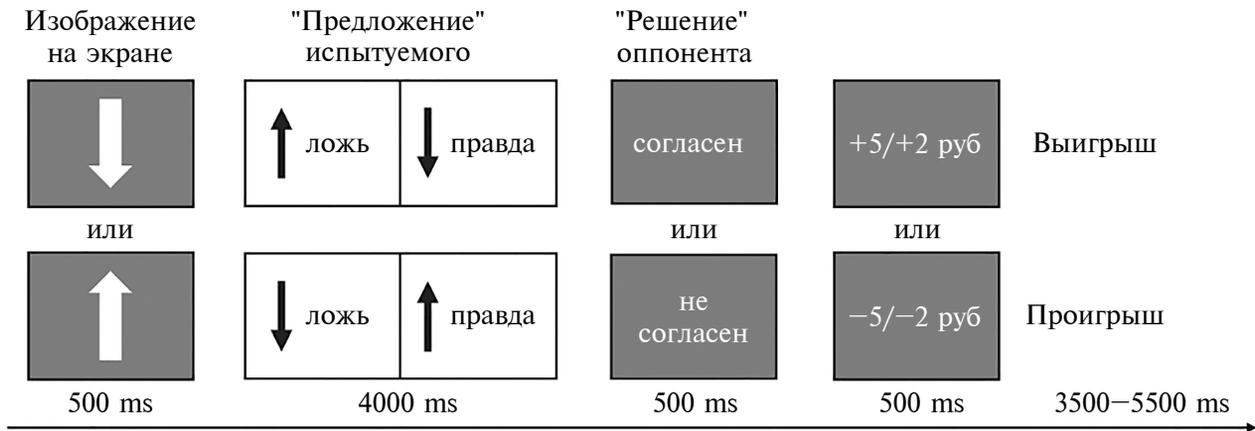
Процедура исследования

Данные фМРТ были получены при выполнении испытуемыми тестового задания, разработанного нами ранее для ЭЭГ-исследований (Киреев и др., 2007) и модифицированного впоследствии для условий функциональной МРТ (Kireev et al., 2013) (см. рис. 1). Во время фМРТ-сканирования испытуемые играли с оппонентом (компьютерной программой) в игру – аналог карточной игры “верю –

не верю”. Во время игры испытуемые сообщали оппоненту направление стрелки (предлагали вариант ориентации – вверх или вниз), которая предъявлена на экране монитора. Данное сообщение “рассматривалось” оппонентом на предмет – верить или не верить такому предложению. Результат “решения” предъявлялся испытуемому путем предъявления слов “согласен” или “не согласен”. Испытуемые инструктировались свободно выбирать между двумя вариантами действий – солгать о направлении стрелки или осуществить правдивое предложение. В свою очередь, оппонент мог поверить или не поверить в предложение испытуемого путем обратной связи в виде предъявленного слова. “Предложение” о направлении стрелки направлялось оппоненту путем нажатия кнопок МР-совместимого манипулятора с фиксированным отношением между определенной кнопкой и сообщаемой информацией – нажатие правой кнопки указательным пальцем правой руки соответствовало направлению “вверх”, а нажатие левой кнопки указательным пальцем левой руки – направлению “вниз”.

Таким образом, моделировалось четыре экспериментальных условия: 1) испытуемый солгал о направлении предъявленной стрелки и оппонент “поверил” (успешная ложь); 2) испытуемый солгал о направлении стрелки, но оппонент “не поверил” такому предложению (неуспешная ложь); 3) испытуемый сообщил правдивую информацию о направлении стрелки и оппонент поверил такому предложению (неуспешная манипулятивная правда); 4) испытуемый сообщил правдивую информацию, но оппонент не поверил такому предложению (успешная манипулятивная правда). В каждой конкретной пробе испытуемый выигрывал только в том случае, если оппонент не верил правдивому предложению и верил ложному. Информация о вознаграждении или штрафе при выигрышных и проигрышных пробах соответственно предъявлялась на экране монитора сразу после “решения” оппонента. Вознаграждения и штрафы имели монетарный характер, т.е. добавлялись или отнимались суммы от вознаграждения, полагавшегося за участие в исследовании. Использовались два типа монетарного подкрепления, равного 5 и 2 рублям. Все тестовое задание состояло из двух исследовательских сессий, отличающихся “стоимостью” ложных и правдивых предложений. В одной из сессий “стоимость” ложных действий (как удачных, так и неудачных) была равна 5 рублям, а “стои-

(а) Игровые пробы



(б) Контрольные пробы

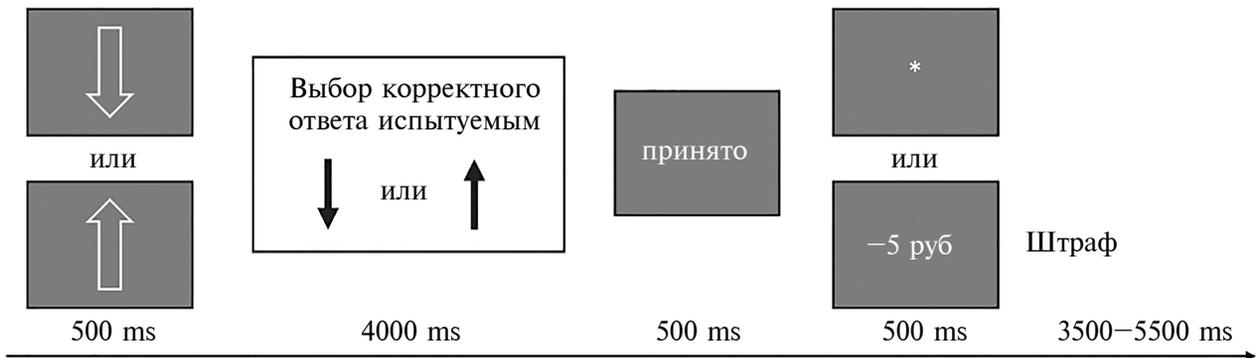


Рис. 1. Схема тестового задания. Регистрация BOLD-сигнала (сигнала, зависящего от содержания кислорода в крови) осуществлялась с использованием МР-томографа Philips Achieva 3 Тесла. Структурные T1-взвешенные МРТ-изображения, используемые впоследствии для пространственной нормализации функциональных МРТ-изображений, регистрировались со следующими параметрами: поле обзора – 240 × 240 (FOV); TR – 25 мс; срезы – 130 аксиальных срезов толщиной 1 мм и размером пикселя размером 1 × 1 мм; угол отклонения вектора намагниченности – 30°. BOLD-сигнал регистрировался с помощью эхопланарных одноимпульсных последовательностей со следующими параметрами (т.н. динамические сканы): время регистрации 32 аксиальных срезов составляло 2 сек (TE = 35 мс), с полем обзора 208 × 208, углом отклонения вектора намагниченности (flip angle) 90° и размером пикселя 3 × 3 мм. Толщина срезов равнялась 3 мм.

Fig. 1. Diagram of the test task. Registration of the BOLD-signal (a signal dependent on the oxygen content in the blood) was performed using a Philips Achieva 3 Tesla MRIr. Structural T1-weighted images, which were used for spatial normalization of functional images, were recorded with the following parameters: field of view – 240 × 240 (FOV); TR – 25 MS; slices – 130 axial slices with a thickness of 1 mm and a pixel size of 1 × 1 mm; the angle of deviation of the magnetization vector – 30°. The BOLD-signal was registered using echoplanar single-pulse sequences with the following parameters (dynamic scans): the time of registration of 32 axial slices was 2 seconds (TE = 35 MS), with a field of view of 208 × 208, the angle of deviation of the magnetization vector (flip angle) of 90° and the pixel size of 3 × 3 mm. The thickness of the slices was 3 mm.

мость” правдивых действий составляла 2 рубля. Другая сессия характеризовалась обратным соотношением монетарной выгоды для ложных и правдивых действий – 2 рубля для ложных и 5 рублей для правдивых. Таким образом, создавались условия для манипуляции размером монетарной выгоды реализуемых ложных и правдивых действий.

Помимо игровых проб, дополнительно, в качестве контрольной пробы, использовалась проба-ловушка (catch-проба), при которой испытуемый должен был нажимать кнопку манипулятора, строго соответствующую направлению стрелки. В случае ошибки испытуемые штрафовались в размере 5 рублей. Таким образом, в каждой отдельной сессии предъявлялось

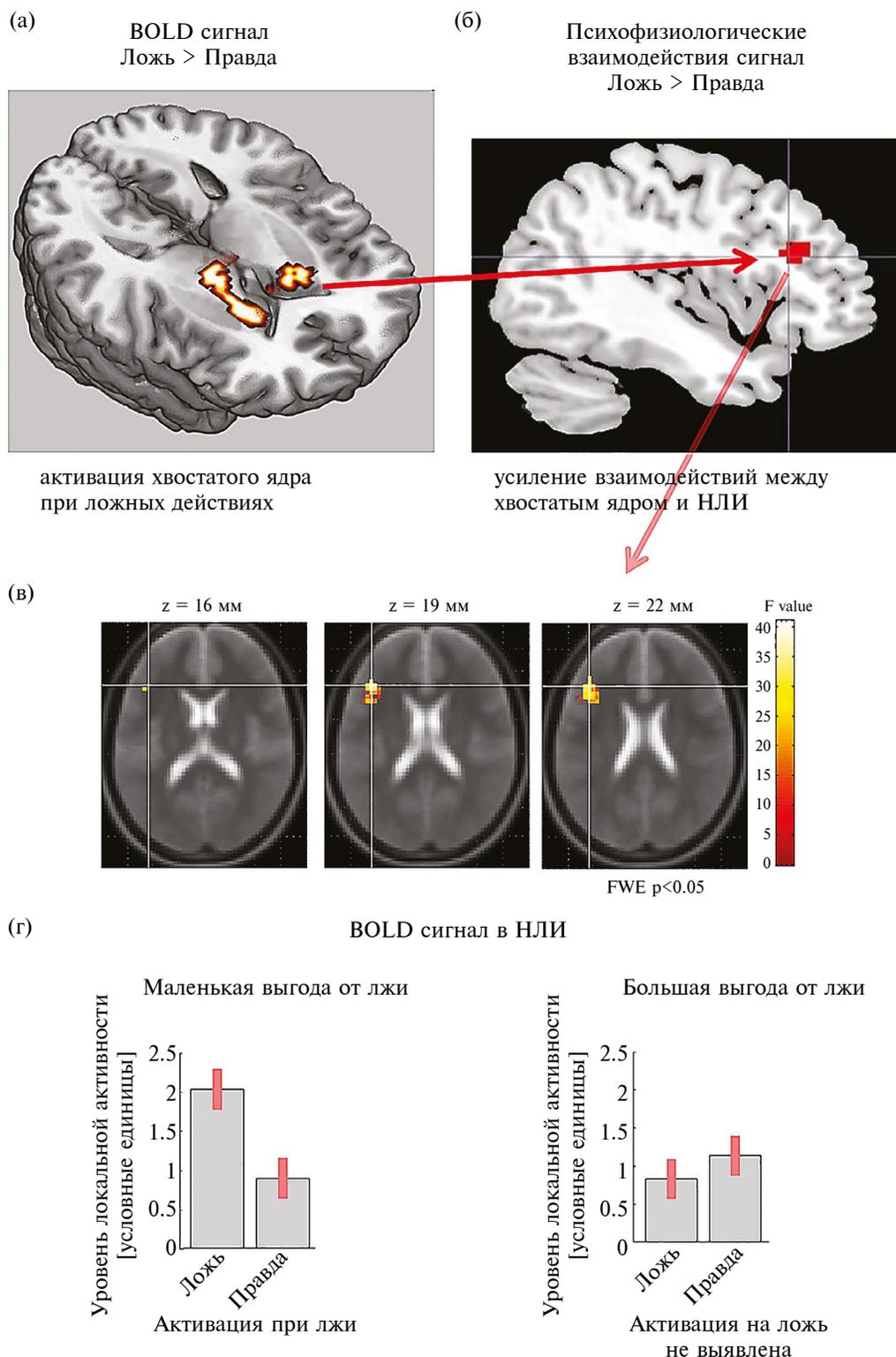


Рис. 2. Влияние размера монетарной выгоды на уровень активности в области левой нижней лобной извилины. (а) Кластеры значимого увеличения BOLD-сигнала при реализации ложных действий, по сравнению с правдивыми (Kireev et al., 2013); (б) Кластер, локализующийся в левой нижней лобной извилине, отражающий зону этой структуры, с которой усиливались функциональные взаимодействия левого хвостатого ядра (обозначено красной стрелкой) (Kireev et al., 2015). Данный кластер в левой нижней лобной извилине выбран в качестве области интереса для анализа; (в) Воксели в анализируемой области интереса, в которых выявлено значимое взаимодействий факторов “тип действия” и “размер монетарной выгоды”; (г) Изменения BOLD-сигнала в этой области левой нижней лобной извилины при сравнении ложных и правдивых “предложений” в условиях отличающегося размера монетар-

ной выгоды. Обозначения: BOLD-сигнал, зависимый от уровня насыщения крови кислородом (blood oxygen level dependent signal), Ложь – ложное “предложение” об ориентации стрелки, Правда – правдивое “предложение” об ориентации стрелки, НИИ – нижняя лобная извилина левого полушария мозга человека.

Fig. 2. Influence of size of monetary benefit on the level of activation in the left inferior lower frontal gyrus. (a) Clusters of significant increase of BOLD-signal during deceptive actions compared to truthful (Kireev et al., 2013); (б) The cluster located in the inferior frontal gyrus, reflecting the area which enhances functional interaction with the left caudate nucleus (marked with a red arrow) (Киреев et al., 2015). This cluster in the inferior frontal gyrus was chosen as a region of interest for the current paper; (в) Voxels in the analyzed region of interest, which revealed significant interactions of the factors “type of actions” and “size of monetary benefit”; (г) Changes in BOLD-signal in left inferior frontal gyrus when comparing deceptive and truthful “suggestions” in conditions of different size of monetary benefit. BOLD-blood oxygenation level dependent signal, Deception – deceptive “offer” about the orientation of the arrow, Truth – truthful “offer” about the orientation of the arrow, IFG – inferior frontal gyrus of the left hemisphere of the human brain.

60 игровых и 30 контрольных проб, отличающихся типом предъявляемой стрелки, инструктирующей испытуемых о типе пробы. Общее время фМРТ-исследования составляло около 40 мин.

Каждая отдельная проба состояла из трех последовательно предъявляемых стимулов: 1) первый стимул – изображение стрелки сплошного белого цвета, ориентированной вверх или вниз, на черном фоне и длительностью 500 мс; 2) второй стимул – предъявлялся через 4.5 сек – стимул обратной связи от “оппонента” в виде слов “согласен” или “не согласен”, длительностью 500 мс; 3) третий стимул – значение выигрыша или штраф (в зависимости от исхода и сессии предъявлялись цифры: “+2” / “+5” / “-2” / “-5”). Испытуемые инструктировались предлагать свой вариант ориентации стрелки в интервале между первым и вторым стимулами проб. Чтобы, с одной стороны, стимулировать испытуемых реализовывать ложные предложения, а с другой, не стимулировать лгать чаще, чем реализовывать правдивые предложения, слово “согласен” предъявлялось в 60% игровых проб. Тем самым испытуемые вводились в заблуждение, что с ними “играет” оппонент, тогда как слова “согласен” и “не согласен” предъявлялись в случайном порядке с заданной вероятностью. Как показали результаты предыдущих исследований, при таком соотношении проб групповые показатели количества ложных и правдивых предложений значимо не отличались (Киреев и др., 2007, 2011).

Параметры сканирования и предварительной обработки

В работе использовались фМРТ-данные, полученные нами ранее (Kireev et al., 2013) с использованием томографа Philips Achieva, с напряженностью поля 3 Тесла. Структурные T1-взвешенные изображения регистрировались до проведения функционального исследова-

ния (T1W3DTFE), со следующими параметрами: поле обзора – 240 × 240 (FOV); TR – 25 мс; срезы – 130 аксиальных срезов толщиной 1 мм и размером пикселя 1 × 1 мм; угол отклонения вектора намагниченности (flip angle) – 30°. Для регистрации BOLD-сигнала использовалась эхо-планарная одноимпульсная последовательность. Время, за которое происходила регистрация данных со всех 32 аксиальных срезов (TR), составляло 2 сек (TE = 35 мс). Поле обзора составляло 208 × 208, а угол отклонения вектора намагниченности (flip angle) – 90°. Размер пикселя составлял 3 × 3 мм. Толщина срезов равнялась 3 мм, с промежутком между ними в 0.3 мм. Таким образом, после трехмерной реконструкции изображения размер единицы объема (воксел, от volume cell) составлял 3 × 3 × 3 мм.

Перед статистической обработкой набор индивидуальных динамических сканов (функциональные изображения BOLD-сигнала) преобразовывался в несколько последовательных этапов: 1) выравнивание всех изображений относительно первого полученного динамического скана (realignment) с расчетом соответствующих параметров смещения; 2) коррекция разницы времени в получении планарных изображений (slice-time correction); 3) нормализация функциональных изображений в стандартное стереотаксическое пространство MNI – Montreal Neurological Institute (normalization) с корегистрацией (coregistration) анатомического структурного T1-изображения с динамическим первым сканом и его сегментацией; 4) гауссовское сглаживание (smoothing, 8 мм (FWHM)).

Статистический анализ данных

Предварительная обработка данных и статистический анализ осуществлялись с использованием программного пакета SPM12 (Statistical parametric mapping 12) на базе среды Matlab (2012b, Mathworks Inc., Natick, MA, USA).

В соответствии с гипотезой исследования статистический анализ данных проводился для области интереса – кластера в зоне нижней лобной извилины левого полушария (см. рис. 2 (а–б); координаты MNI: $x = -39, y = 17, z = 19$; размер = 64 воксела). Данный кластер был выбран на основе области, которая по полученным ранее для данной выборки результатам: 1) демонстрировала усиление взаимодействий с левым хвостатым ядром при реализации ложных действий по сравнению с правдивыми (по данным анализа психофизиологических взаимодействий (Киреев и др., 2015), см. рис. 2 (б)); 2) испытывала активирующее влияние со стороны левого хвостатого ядра при реализации как ложных действий, так и правдивых действий (Киреев и др., 2018).

Статистический анализ проводился в два этапа с использованием общей линейной модели множественной регрессии. На первом этапе для каждого испытуемого строилась линейная модель, где в качестве регрессоров использовались времена действия (нажатия на кнопку) в следующих экспериментальных пробах: 1) ложное действие при относительно высокой монетарной выгоде; 2) правдивое действие при относительно низкой монетарной выгоде; 3) ложное действие при относительно низкой монетарной выгоде; 4) правдивое действие при относительно высокой монетарной выгоде; 5) контрольная проба (catch-пробы). Кроме того, в статистическую модель включались регрессоры, моделирующие игнорируемые переменные: регрессоры стимулов обратной связи (“решение” оппонента), регрессоры, моделирующие эффект сессии, а также 6 регрессоров, моделирующих изменения сигнала, связанные со смещением головы испытуемого относительно первого динамического скана. Исследование проводилось в режиме, связанном с событием (event-related), где каждое событие моделировалось отдельно путем свертки времени нажатия на кнопку со стандартной функцией гемодинамического ответа. Стандартная функция гемодинамического ответа описывает то, как BOLD-сигнал, отражающий изменения нейрональной активности, изменяется в связи с одним экспериментальным событием. Таким образом, в результате первого этапа анализа была создана модель изменений BOLD-сигнала в ответ на нажатия на кнопку в 5 типах экспериментальных проб, соответствующих 5 регрессорам.

В качестве переменных для второго, группового этапа статистического анализа данных ис-

пользовались получаемые на индивидуальном этапе разности бета-коэффициентов (линейный контраст) между регрессорами вида “тип экспериментальной пробы” и “контрольная проба (catch)” (далее просто “тип экспериментальной пробы”). Полученная разность отражает разницу BOLD-сигнала в интересующих условиях (в относительных единицах). Групповой анализ данных проводился в режиме повоксельного анализа для области интереса объемом 64 воксела, которая локализовалась в левой нижней лобной извилине, а также для средних значений BOLD-сигнала 64 вокселов анализируемой области интереса. Эффект влияния размера монетарной выгоды на изменения BOLD-сигнала, связанные с типом действия (ложного или правдивого), оценивался с помощью модели двухфакторного дисперсионного анализа со следующими факторами: тип действия (ложный или правдивый), размер монетарной выгоды (высокий или низкий). Для проверки гипотезы исследования оценивалось взаимодействие двух факторов с использованием соответствующего F-контраста. Для выяснения характера взаимодействия двух факторов рассчитывались t-контрасты между интересующими пробами. Для контроля ошибки первого рода применялась коррекция на множественные сравнения с применением воксельного порога $pFWE < 0.05$. Данный, довольно строгий вариант коррекции на множественность сравнений использовался исходя из того, что поиск значимых изменений осуществлялся в малой, заранее выбранной области интереса. Усреднение изменений сигнала в области интереса, групповое сравнение на уровне всей области интереса и определение направления изменений BOLD-сигнала проводилось с использованием программного пакета REX (<https://www.nitrc.org/projects/rex/>).

Для сравнения “Ложь > Правда” при высокой монетарной выгоде на уровне всей области интереса рассчитывались Байесовские факторы (Bayes Factor, BF) согласно подходу, предложенному в Dienes (Dienes, 2014). Байесовские факторы позволяют количественно оценить, свидетельствуют ли полученные данные в пользу нулевой или альтернативной гипотезы. Согласно нулевой гипотезе, разность между двумя условиями равна нулю, т.е. отсутствует. Согласно альтернативной гипотезе, разность распределена между предположительными значениями. Предположения о возможных значениях разности для интересующего сравнения были сделаны на основе другого сравнения: “Ложь > Правда” при низкой мо-

нетарной выгоде. Предположение заключалось в том, что разность в уровне BOLD-сигнала при ложных действиях, по сравнению с правдивыми действиями, в условии высокой монетарной выгоды должна быть больше нуля и примерно соответствовать (быть такой же или меньше) аналогичной разности в условии низкой монетарной выгоды. Использовались два распределения для альтернативной гипотезы (Dienes, 2014): 1) разность нормально распределена, наиболее вероятное значение разности “Ложь > Правда” при высокой выгоде равно среднему значению разности при низкой выгоде, стандартное отклонение равно половине среднего значения разности при низкой выгоде; 2) разность имеет полунормальное распределение, наиболее вероятное значение разности “Ложь > Правда” при высокой выгоде равно нулю, стандартное отклонение равно среднему значению при низкой выгоде. Две возможные альтернативные гипотезы позволяют проверить чувствительность Байесовского анализа к обнаружению наличия или отсутствия значимой разности. В отличие от классической статистики использование Байесовской статистики позволяет не только найти статистически значимые различия, но и принять нулевую гипотезу об отсутствии различий. Если $BF > 3$ (Jeffreys, 1961), то получено сильное свидетельство в пользу наличия различий, если $BF < 1/3$, то получено свидетельство в пользу отсутствия различий, промежуточные значения не позволяют с уверенностью сделать вывод в пользу отсутствия или наличия различий.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Статистический анализ взаимодействия факторов “тип действия” и “размер монетарной выгоды” оказался значимым для 51 из 64 вокселей, составляющих анализируемую область интереса (см. рис. 2 (в)). Выявленный кластер содержал два максимума со следующими координатами: 1) $x = -42$, $y = 26$, $z = 19$, $Z = 5.67$, $pFWE < 0.001$; 2) $x = -48$, $y = 23$, $z = 10$, $Z = 3.54$, $pFWE < 0.01$. Анализ разности средних значений коэффициентов регрессии, соответствующих каждому типу анализируемых проб, представлен на рис. 2 (г) и показывает, что в условиях низкой монетарной выгоды ложные действия, по сравнению с правдивыми, характеризуются повышенным энергопотреблением (по данным уровня BOLD-сигнала) в анализируемой области интереса в нижней лобной извилине левого полушария. При этом при увеличении монетарной выгоды значимой разницы в энергопотреблении между ложными

и правдивыми действиями не обнаруживается. Дополнительно при сравнении ложных действий при низкой монетарной выгоде с ложными действиями при высокой монетарной выгоде с использованием соответствующего t -контраста выявлено увеличение BOLD-сигнала в 30 вокселях в анализируемой области интереса ($x = -42$, $y = 32$, $z = 22$ – $Z = 5.67$, $pFWE < 0.001$). Расчет обратного t -контраста не выявил значимого увеличения BOLD-сигнала при реализации ложных действий в условиях высокой монетарной выгоды, по сравнению с относительно маловыгодными ложными действиями.

Анализ средних значений BOLD-сигнала в области интереса также выявил значимое взаимодействие факторов “тип действия” и “размер монетарной выгоды” ($F = 42.12$, $p < 0.0001$). Обнаружены статистически значимые различия в t -контрасте “Ложь > Правда” при низкой монетарной выгоде ($t = 9.6$, $p < 0.001$), размер эффекта Cohen’s $d = 1.96$, что соответствует “очень большому” размеру эффекта (Sawilowsky, 2009). При этом не удалось обнаружить статистически значимых различий в t -контрасте “Ложь > Правда” при высокой монетарной выгоде ($t = -1.39$, $p = 0.168$), размер эффекта Cohen’s $d = -0.28$, что соответствует “небольшому” размеру эффекта. Байесовский фактор для этого сравнения с альтернативной гипотезой, имеющей нормальное распределение, – $BF = 0.04$, а с альтернативной гипотезой, имеющей полунормальное распределение, – $BF = 0.05$. В обоих случаях $BF < 1/3$, что позволяет говорить о “сильном” свидетельстве в пользу отсутствия различий, т.е. можно принять нулевую гипотезу.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Таким образом, в результате настоящего исследования показано, что в ситуации меньшей ожидаемой выгоды ложного действия вовлечение механизма ДО сопровождается увеличением локальной активности левой нижней лобной извилины. Однако, как показал байесовский анализ практической эквивалентности, при большей монетарной выгоде ложного действия BOLD-сигнал в нижней лобной извилине статистически значимо не отличается от ситуации правдивого действия. При этом повышение монетарной выгоды сопровождается снижением BOLD-сигнала в области нижней лобной извилины при реализации ложных действий (до уровня BOLD-сигнала при правдивых действиях).

Вовлечение префронтальной коры в обеспечение ложных действий является одной из наиболее частых находок при нейровизуализационных исследованиях вне зависимости от особенностей исследовательской парадигмы и тестовых заданий (Abe et al., 2006; Lee et al., 2002; Nuñez et al., 2005; Spence et al., 2004). Большинство авторов связывают функции вентролатеральной префронтальной коры при реализации ложных действий с обеспечением торможения конкурирующей доминантной реакции – правдивого ответа (Miller, Cohen, 2001). Метаанализ, проведенный Christ и др. (Christ et al., 2009), показал, что при лжи вовлечение вентролатеральной префронтальной коры (включающей отделы нижней лобной извилины) связано со всеми тремя исследованными аспектами когнитивного контроля: тормозным контролем, процессами рабочей памяти и переключением между заданиями. В свете таких представлений выявленное нами снижение уровня функциональной активности в нижней лобной извилине при большей выгоде может означать снижение конкуренции с доминантной правдивой реакцией.

Рассматривая полученный результат с позиции представлений о механизме ДО, можно предположить, что при лжи меньшая реактивность относительных изменений локальной активности нижней лобной извилины при большей выгоде является отражением меньшей реактивности этой структуры в ответ на информацию об ошибке. Информация от ДО о несоответствии действия матрице нормы (т.е. некорректности действия) в меньшей степени учитывается в процессе принятия решения и реализации ложного действия, обеспечиваемого нижней лобной извилиной, т.е. при большей ожидаемой выгоде становится менее значимой для принятия решения. Данный эффект дополнительно демонстрирует, почему механизм ДО, по своей сути, является механизмом оптимизации реализации деятельности, а не ее управления. В ряде ситуаций срабатывание механизма ДО может учитываться управляющими системами мозга в меньшей степени или игнорироваться.

Различия в реактивности левой нижней лобной извилины могут быть объяснены и с точки зрения ее роли в использовании абстрактных правил или закономерностей и обнаружении отклонений от них (Winkler, Czigler, 1998). Ее активация связана с обнаружением несогласия

с имеющимися в памяти “стандартными” конструкциями (Deouell, 2007; Fitzgerald, Todd, 2020; Paavilainen, 2013; Schönwiesner et al., 2007). Также левая вентролатеральная префронтальная кора ассоциируется с хранением и воспроизведением правил, состоящих из соответствий действий их результатам и моральному контексту (Badre et al., 2005; Bhanji et al., 2010; Bunge, 2004; Carlson, Crockett, 2018; Souza et al., 2009). Более того, левая латеральная префронтальная кора вносит вклад в сопоставление данных правил с возможной монетарной выгодой от их использования, вступая в функциональные взаимодействия с областями системы вознаграждения (Dixon, Christoff, 2014; Parro et al., 2018).

В заданиях, допускающих сообщение лжи ради получения монетарной выгоды, может возникать моральный конфликт, разрешение которого требует вовлечения когнитивного контроля и обеспечивается дорсолатеральной и передней префронтальной корой (Dogan et al., 2016; Karim et al., 2010; Shalvi et al., 2012; Sun et al., 2017; Zhu et al., 2014). Важно, что испытуемые в норме могут подавить эгоистичные мотивы и воздержаться от лжи, так как при нарушении работы указанных структур мозга или их экспериментальной деактивации происходит так называемое “растормаживание”, проявляясь в более частом обмане, снижении времени реакции, возбуждения и оценок вины при реализации лжи (Karim et al., 2010; Priori et al., 2008; Zhu et al., 2014). Таким образом, связанная с обеспечением процессов применения правил поведения, нижняя лобная извилина при реализации лжи предположительно занимает роль связующего звена, усиливая взаимодействия как с областями системы вознаграждения, так и с левой дорсолатеральной префронтальной корой (Yin, Weber, 2019). Анализ направленности функциональных взаимодействий при принятии решения о сообщении правды или лжи показал, что данная область мозга получает модулирующее влияние от областей, связанных с обнаружением конфликта, и влияет на активность в дорсолатеральной префронтальной коре, ассоциирующейся с вовлечением когнитивного контроля для разрешения конфликта (Dogan et al., 2016; Киреев и др., 2018). Таким образом, роль левой нижней лобной извилины в управлении поведением при выборе между ложью и правдой может заключаться в актуализации и воспроизведении правил, необходимых для выбора правды, соответствующей нормам поведения.

В подтверждение такой функциональной роли этой структуры, когда испытуемые были готовы отказаться от своих моральных принципов в обмен на деньги, наблюдалось относительное снижение активности в нижней лобной извилине (Berns et al., 2012). При этом в определенном контексте следование правилам может являться невыгодным. К таким условиям можно отнести в том числе наличие более высокого монетарного вознаграждения и так называемую финансовую депривацию, которые оправдывают использование лжи (Cannito et al., 2023). После потери денег в сравнении с выигрышем денег испытуемые чаще говорили ложь (Sharma et al., 2014), и снижалась связанная с ней активность в дорсолатеральной префронтальной коре (Sun et al., 2017). В пробах с высоким в сравнении с низким монетарным вознаграждением за ложь снижались функциональные взаимодействия между левой нижней лобной извилиной и другими областями префронтальной коры (дорсолатеральная и дорсомедиальная), правда, только у менее склонных к честности испытуемых (Dogan et al., 2016). Интерпретируя полученные нами результаты в совокупности с цитируемыми выше литературными данными, можно предположить, что снижение относительных изменений активности левой нижней лобной извилины при возможности получить более высокое монетарное вознаграждение отражает меньшее вовлечение процесса воспроизведения абстрактных правил поведения или меньшее рассогласование с нормами поведения, несмотря на сигнал ДО о некорректности действия.

Выявленный нейрофизиологический эффект, на наш взгляд, заслуживает целенаправленного изучения, поскольку ставит новые вопросы. В частности, остается невыясненным, где и как происходит обработка информации о величине выгоды – участвует ли в ней именно эта область нижней лобной извилины или она испытывает модулирующие влияния других структур лобно-теменной системы. Возникает вопрос и о специфичности выявленных изменений именно для монетарной выгоды, или имеет место более универсальный характер, связанный с любой персональной выгодой вообще (например, социально значимой и т.д.). Возможно, именно с выявленным нами нейрофизиологическим эффектом связан механизм постепенных изменений внутренних представлений о допустимом – повторяющиеся некорректные действия, несмотря на сигнал ДО о его некорректности, приводят к изменению матрицы нормы. Использованный нами подход, предполагающий совместный анализ данных о дистантных функциональных взаимодействиях и уровнях активации звеньев изучаемых нейроанатомических систем с учетом ведущей роли мозгового механизма ДО и его взаимодействия со структурами лобно-теменной нейроанатомической системы, открывает новые возможности для исследования мозгового обеспечения манипулятивных действий. В частности, такой подход представляется эффективным для получения новых данных о степени автоматизации, осознанности манипулятивных действий.

В настоящей работе показано, что сигнализирующее о некорректности ложного действия модулирующее влияние хвостатого ядра на зону левой нижней лобной извилины, которое наблюдалось нами ранее (Киреев и др., 2015), может сопровождаться разным уровнем ее активности в зависимости от потенциальной выгоды ложных действий: при более высокой выгоде лжи уровень активации этой зоны ниже, чем при относительно меньшей выгоде. Полученный результат раскрывает возможный механизм влияния ожидаемой монетарной выгоды на принятие манипулятивного ложного решения: размер монетарной выгоды при принятии решений предопределяет степень влияния информации о некорректности планируемого действия от ДО. Иными словами, в условиях повышения возможной монетарной выгоды влияние работы ДО на выработку решения о лжи может ослабевать. Таким образом, изучение мозговых механизмов обеспечения деятельности человека с позиций представлений о ДО позволяет по-новому взглянуть на работу мозговых систем при принятии решений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе показано, что сигнализирующее о некорректности ложного действия модулирующее влияние хвостатого ядра на зону левой нижней лобной извилины, которое наблюдалось нами ранее (Киреев и др., 2015), может сопровождаться разным уровнем ее активности в зависимости от потенциальной выгоды ложных действий: при более высокой выгоде лжи уровень активации этой зоны ниже, чем при относительно меньшей выгоде. Полученный результат раскрывает возможный механизм влияния ожидаемой монетарной выгоды на принятие манипулятивного ложного решения: размер монетарной выгоды при принятии решений предопределяет степень влияния информации о некорректности планируемого действия от ДО. Иными словами, в условиях повышения возможной монетарной выгоды влияние работы ДО на выработку решения о лжи может ослабевать. Таким образом, изучение мозговых механизмов обеспечения деятельности человека с позиций представлений о ДО позволяет по-новому взглянуть на работу мозговых систем при принятии решений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данные, используемые в данной работе, были получены в рамках государственного задания Минобрнауки ИМЧ РАН, а сама работа была выполнена при поддержке гранта РНФ 23-18-00521.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Киреев М.В., Старченко М.Г., Пахомов С.В., Медведев С.В. Этапы мозгового обеспечения заведомо ложных ответов. Физиология человека. 2007. 33: 5.
- Киреев М.В., Коротков А.Д., Поляков Ю.И., Аничков А.Д., Медведев С.В. Мозговой механизм детекции оши-

- бок — ПЭТ исследование. Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова. 2011. 97: 1060.
- Куреев М.В., Медведева Н.С., Коротков А.Д., Медведев С.В.* Особенности функционального взаимодействия хвостатого ядра и нижней лобной извилины в процессе обеспечения сознательных ложных действий. Физиология человека. 2015. 41: 29–34.
- Куреев М.В., Коротков А.Д., Котомин И., Медведев С.В.* Особенности системной организации мозговых систем, вовлекаемые в обеспечение подготовки действий. Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова. 2018. 104: 300–311.
- Abe N., Suzuki M., Tsukiura T., Mori E., Yamaguchi K., Itoh M., Fujii T.* Dissociable roles of prefrontal and anterior cingulate cortices in deception. *Cereb. Cortex* 2006. 16(2): 192–199. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhi097>
- Badre D., Poldrack R.A., Juliana Paré-Blagoev E., Insler R.Z., Wagner A.D.* Dissociable Controlled Retrieval and Generalized Selection Mechanisms in Ventrolateral Prefrontal Cortex. *Neuron* 2005. 47: 907–918. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2005.07.023>
- Bechtereva N.P., Gretchin V.B.* Physiological Foundations of Mental Activity. *Int. Rev. Neurobiol.* 1969. 11: 329–352. [https://doi.org/10.1016/S0074-7742\(08\)60392-X](https://doi.org/10.1016/S0074-7742(08)60392-X)
- Bechtereva N.P., Medvedev S. V., Abdullaev Y.G.* Neural correlate of mental error detection in the human brain cortex. *Biomed. Sci.* 1991. 2 (3): 301–305.
- Bechtereva N.P., Shemyakina N.V., Starchenko M.G., Danko S.G., Medvedev S.V.* Error detection mechanisms of the brain: Background and prospects. *Int. J. Psychophysiol.* 2005. 58 (2–3): 227–234. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2005.06.005>
- Berns G.S., Bell E., Capra C.M., Prietula M.J., Moore S., Anderson B. et al.* The price of your soul: neural evidence for the non-utilitarian representation of sacred values. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 2012. 367 (1589): 754–762. <https://doi.org/10.1098/RSTB.2011.0262>
- Bhanji J.P., Beer J.S., Bunge S.A.* Taking a gamble or playing by the rules: Dissociable prefrontal systems implicated in probabilistic versus deterministic rule-based decisions. *Neuroimage* 2010. 49 (2): 1810–1819. <https://doi.org/10.1016/j.NEUROIMAGE.2009.09.030>
- Botvinick M.M., Carter C.S., Braver T.S., Barch D.M., Cohen J.D.* Conflict monitoring and cognitive control. *Psychol. Rev.* 2001. 108 (3): 624–652. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.108.3.624>
- Bunge S.A.* How we use rules to select actions: A review of evidence from cognitive neuroscience. *Cogn. Affect. Behav. Neurosci.* 2004. 4 (4): 564–579. <https://doi.org/10.3758/CABN.4.4.564>
- Cannito L., Palumbo R., Sacco P.L.* Measure for measure: Effects of money exposure, reward size and loss aversion on cheating. *Curr. Res. Behav. Sci.* 2023. 4: 100110. <https://doi.org/10.1016/J.CRBEHA.2023.100110>
- Carlson R.W., Crockett M.J.* The lateral prefrontal cortex and moral goal pursuit. *Curr. Opin. Psychol.* 2018. 24: 77–82. <https://doi.org/10.1016/J.COPSYC.2018.09.007>
- Christ S.E., Van Essen D.C., Watson J.M., Brubaker L.E., McDermott K.B.* The Contributions of Prefrontal Cortex and Executive Control to Deception: Evidence from Activation Likelihood Estimate Meta-analyses. *Cereb. Cortex* 2009. 19 (7): 1557–1566. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhn189>
- Cieslik E.C., Ullsperger M., Gell M., Eickhoff S.B., Langner R.* Success versus failure in cognitive control: meta-analytic evidence from neuroimaging studies on error processing. *bioRxiv.* 2023. <https://doi.org/10.1101/2023.05.10.540136>
- Deouell L.Y.* The frontal generator of the mismatch negativity revisited. *J. Psychophysiol.* 2007. 21 (3–4): 188–203. <https://doi.org/10.1027/0269-8803.21.34.188>
- Dienes Z.* Using Bayes to get the most out of non-significant results. *Front. Psychol.* 2014. 5: 85883. <https://doi.org/10.3389/FPSYG.2014.00781>
- Dixon M.L., Christoff K.* The lateral prefrontal cortex and complex value-based learning and decision making. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2014. 45: 9–18. <https://doi.org/10.1016/J.NEUBIOREV.2014.04.011>
- Dogan A., Morishima Y., Heise F., Tanner C., Gibson R., Wagner A.F., Tobler P.N.* Prefrontal connections express individual differences in intrinsic resistance to trading off honesty values against economic benefits. *Sci. Reports* 2016. 6 (1): 1–12. <https://doi.org/10.1038/srep33263>
- Fitzgerald K., Todd J.* Making Sense of Mismatch Negativity. *Front. Psychiatry* 2020. 11: 468. <https://doi.org/10.3389/FPSYT.2020.00468>
- Fu Z., Beam D., Chung J.M., Reed C.M., Mamelak A.N., Adolphs R., Rutishauser U.* The geometry of domain-general performance monitoring in the human medial frontal cortex. *Science* 2022. 376 (6593): eabm9922. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.ABM9922>
- Gino F., Pierce L.* The abundance effect: Unethical behavior in the presence of wealth. *Organ. Behav. Hum. Decis. Process.* 2009. 109 (2): 142–155. <https://doi.org/10.1016/J.OBHDP.2009.03.003>
- Hannah R., Aron A.R.* Towards real-world generalizability of a circuit for action-stopping. *Nat. Rev. Neurosci.* 2021. 22 (9): 538–552. <https://doi.org/10.1038/s41583-021-00485-1>
- Ito A., Abe N., Fujii T., Ueno A., Koseki Y., Hashimoto R. et al.* The role of the dorsolateral prefrontal cortex in deception when remembering neutral and emotional events. *Neurosci. Res.* 2011. 69 (2): 121–128. <https://doi.org/10.1016/j.neures.2010.11.001>
- Jeffreys H.* The theory of probability. 3rd. Ed. Oxford, Engl. Oxford Univ. Press 1961. 470.
- Karim A.A., Schneider M., Lotze M., Veit R., Sauseng P., Braun C., Birbaumer N.* The truth about lying: Inhibition of the anterior prefrontal cortex improves deceptive behavior. *Cereb. Cortex* 2010. 20 (1): 205–213.

- <https://doi.org/10.1093/cercor/bhp090>
Kireev M., Korotkov A., Medvedeva N., Medvedev S. Possible role of an error detection mechanism in brain processing of deception: PET-fMRI study. *Int. J. Psychophysiol.* 2013. 90 (3): 291–299.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2013.09.005>
- Kouchaki M., Smith-Crowe K., Brief A.P., Sousa C.* Seeing green: Mere exposure to money triggers a business decision frame and unethical outcomes. *Organ. Behav. Hum. Decis. Process.* 2013. 121 (1): 53–61.
<https://doi.org/10.1016/J.OBHDP.2012.12.002>
- Lee T.M.C., Liu H.L., Tan L.H., Chan C.C.H., Mahankali S., Feng C.M. et al.* Lie detection by functional magnetic resonance imaging. *Hum. Brain Mapp.* 2002. 15 (3): 157–164. <https://doi.org/10.1002/HBM.10020>
- MacDonald A.W., Cohen J.D., Andrew Stenger V., Carter C.S.* Dissociating the role of the dorsolateral prefrontal and anterior cingulate cortex in cognitive control. *Science* 2000. 288 (5472): 1835–1838.
<https://doi.org/10.1126/SCIENCE.288.5472.1835>
- Masina F., Tarantino V., Vallesi A., Mapelli D.* Repetitive TMS over the left dorsolateral prefrontal cortex modulates the error positivity: An ERP study. *Neuropsychologia* 2019. 133: 107153.
<https://doi.org/10.1016/J.NEUROPSYCHOLOGIA.2019.107153>
- McClure S.M., Laibson D.I., Loewenstein G., Cohen J.D.* Separate neural systems value immediate and delayed monetary rewards. *Science.* 2004. 306 (5695): 503–507.
<https://doi.org/10.1126/science.1100907>
- Miller E.K., Cohen J.D.* An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annu. Rev. Neurosci.* 2001. 24: 167–202.
<https://doi.org/10.1146/ANNUREV.NEURO.24.1.167>
- Morein-Zamir S., Robbins T.W.* Fronto-striatal circuits in response-inhibition: Relevance to addiction. *Brain Res.* 2015. 1628: 117–129.
<https://doi.org/10.1016/J.BRAINRES.2014.09.012>
- Nuñez J.M., Casey B.J., Egner T., Hare T., Hirsch J.* Intentional false responding shares neural substrates with response conflict and cognitive control. *Neuroimage* 2005. 25 (1): 267–277.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.10.041>
- Oldfield R.C.* The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia* 1971. 9 (1): 97–113.
[https://doi.org/10.1016/0028-3932\(71\)90067-4](https://doi.org/10.1016/0028-3932(71)90067-4)
- Paavilainen P.* The mismatch-negativity (MMN) component of the auditory event-related potential to violations of abstract regularities: a review. *Int. J. Psychophysiol.* 2013. 88 (2): 109–123.
<https://doi.org/10.1016/J.IJPSYCHO.2013.03.015>
- Parro C., Dixon M.L., Christoff K.* The neural basis of motivational influences on cognitive control. *Hum. Brain Mapp.* 2018. 39 (12): 5097.
<https://doi.org/10.1002/HBM.24348>
- Priori A., Mameli F., Cogiamanian F., Marceglia S., Tiriticco M., Mrakic-Spota S. et al.* Lie-specific involvement of dorsolateral prefrontal cortex in deception. *cereb. Cortex* 2008. 18 (2): 451–455.
<https://doi.org/10.1093/CERCOR/BHM088>
- Sawilowsky S.S.* New effect size rules of thumb. *J. Mod. Appl. Stat. Methods* 2009. 8 (2): 26.
<https://doi.org/10.22237/jmasm/1257035100>
- Schönwiesner M., Novitski N., Pakarinen S., Carlson S., Tervaniemi M., Näätänen R.* Heschl's gyrus, posterior superior temporal gyrus, and mid-ventrolateral prefrontal cortex have different roles in the detection of acoustic changes. *J. Neurophysiol.* 2007. 97 (3): 2075–2082.
<https://doi.org/10.1152/JN.01083.2006>
- Shalvi S., Eldar O., Bereby-Meyer Y.* Honesty requires time (and lack of justifications). *Psychol. Sci.* 2012. 23 (10): 1264–1270.
<https://doi.org/10.1177/0956797612443835>
- Sharma E., Mazar N., Alter A.L., Ariely D.* Financial deprivation selectively shifts moral standards and compromises moral decisions. *Organ. Behav. Hum. Decis. Process.* 2014. 123 (2): 90–100.
<https://doi.org/10.1016/J.OBHDP.2013.09.001>
- Souza M.J., Donohue S.E., Bunge S.A.* Controlled retrieval and selection of action-relevant knowledge mediated by partially overlapping regions in left ventrolateral prefrontal cortex. *Neuroimage* 2009. 46 (1): 299–307.
<https://doi.org/10.1016/J.NEUROIMAGE.2009.01.046>
- Spence S.A., Hunter M.D., Farrow T.F.D., Green R.D., Leung D.H., Hughes C.J., Ganesan V.* A cognitive neurobiological account of deception: Evidence from functional neuroimaging. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 2004.
<https://doi.org/10.1098/rstb.2004.1555>
- Sun P., Ling X., Zheng L., Chen J., Li L., Liu Z., Cheng X., Guo X.* Modulation of financial deprivation on deception and its neural correlates. *Exp. Brain Res.* 2017. 235 (11): 3271–3277.
<https://doi.org/10.1007/S00221-017-5052-Y>
- Winkler I., Czigler I.* Mismatch negativity: deviance detection or the maintenance of the “standard.” *Neuroreport* 1998. 9 (17): 3809–3813.
<https://doi.org/10.1097/00001756-199812010-00008>
- Wu J., Huang J., Li J., Chen X., Xiao Y.* The role of conflict processing mechanism in deception responses. *Sci. Rep.* 2022. 12 (1): 18300.
<https://doi.org/10.1038/S41598-022-21569-7>
- Yeung N., Botvinick M.M., Cohen J.D.* The neural basis of error detection: Conflict monitoring and the error-related negativity. *Psychol. Rev.* 2004. 111 (4): 931–959.
<https://doi.org/10.1037/0033-295X.111.4.931>
- Yin L., Weber B.* I lie, why don't you: Neural mechanisms of individual differences in self-serving lying. *Hum. Brain Mapp.* 2019. 40 (4): 1101–1113.
<https://doi.org/10.1002/hbm.24432>
- Zhou Y., Wang Y., Rao L.L., Yang L.Q., Li S.* Money talks: Neural substrate of modulation of fairness by monetary incentives. *Front. Behav. Neurosci.* 2014. 8 (MAY): 80319.

<https://doi.org/10.3389/FNBEH.2014.00150/ABSTRACT>
Zhu L., Jenkins A.C., Set E., Scabini D., Knight R.T., Chiu P.H.
et al. Damage to dorsolateral prefrontal cortex affects

tradeoffs between honesty and self-interest. *Nat. Neurosci.* 2014 17(10): 1319–1321.
<https://doi.org/10.1038/nn.3798>

THE ACTIVITY OF THE LEFT INFERIOR FRONTAL GYRUS AND THE ERROR DETECTION BRAIN MECHANISM DURING DECEPTION UNDER CONDITIONS OF DIFFERENT MONETARY BENEFIT

**A. D. Korotkov^{a, #}, M. A. Zheltyakova^a, R. S. Masharipov^a, M. D. Didour^a,
D. V. Cherednichenko^a, M. V. Kireev^{a, b}**

^a*N.P. Bechtereva Institute of the Human Brain, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia*

^b*Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

[#]*e-mail: korotkov@ihb.spb.ru*

This research is aimed at investigating the characteristics of activity of brain areas that underlie action execution and are modulated by the error detection mechanism under conditions of various potential monetary benefits of manipulative truthful and false actions. It is shown that the implementation of potentially less profitable deceptive actions is associated with a relatively higher level of functional activity of the inferior frontal gyrus, a structure that receives information from structures associated with the error detection mechanism. This effect was revealed in experimental conditions with less reinforced deceptive actions, both in comparison with relatively more rewarded deception, and with manipulative truthful actions, regardless of their reward. Moreover, the increase in the profit of deceptive actions is accompanied by the disappearance of a statistically significant difference in the activity of the ventrolateral prefrontal cortex, which has been observed in the comparison of equally low profitable truthful and false actions. These results indicate a possible mechanism of expected monetary benefit influence on the manipulative decision to lie, according to which, the prefrontal structures underlying control of behavior show less susceptibility to the involvement of the error detection mechanism in maintaining deceptive actions.

Keywords: error detection, monetary benefit, prefrontal cortex