

# **ДАЛЕЕ ТЕКСТ ПЕРЕРАБОТАН МНОЙ.** **ЭТО НЕ СТАТЬЯ, А ПЕРЕПИСАННЫЙ** **МНОЙ ОСМЫСЛЕННЫЙ ТЕКСТ НА** **ОСНОВЕ СТАТЬИ**

He J, Zhao H, Turel O, Zhang S, Lei X, Qiu J, et al. Neural underpinnings of internet gaming addiction tendency: The role of the limbic network in reward/punishment sensitivity and risky decision-making alterations. *Addiction*. 2026;121(3):535–546. <https://doi.org/10.1111/add.70219>

**Нейронные основы склонности к интернет-игровой зависимости: роль лимбической сети в изменениях чувствительности к вознаграждению/наказанию и принятии рискованных решений**

**Авторы:** Цзинчжэнь Хэ<sup>1</sup> | Хайчао Чжао<sup>1</sup> | Офир Турель<sup>2</sup> | Шуюэ Чжан<sup>3</sup> | Сюй Лэй<sup>1</sup> | Цзян Цю<sup>1</sup> | Тинъюн Фэн<sup>1</sup> | Хун Чэнь<sup>1</sup> | Цинхуа Хэ<sup>1</sup>

## **Аннотация**

**Обоснование и цели:** Интернет-игровая зависимость (ИИЗ) связана с изменённой чувствительностью к вознаграждению и наказанию, а также с нарушениями в принятии рискованных решений. Тем не менее, лежащие в основе этих изменений нейронные механизмы остаются недостаточно изученными. В данном исследовании изучались поведенческие и нейронные предикторы склонности к ИИЗ с использованием нескольких наборов данных.

**Дизайн:** Обсервационное исследование.

**Место проведения и участники:** В поведенческо-нейровизуализационном поперечном наборе данных (BBC) приняли участие в общей сложности 1142 студента университета [360 мужчин и 782 женщины, средний возраст (стандартное отклонение) 18,75 (1,67) года]. Подвыборка из 303 участников BBC [71 мужчина и 232 женщины, средний возраст на исходном уровне 18,84 (1,72) года] участвовала в поведенческом лонгитюдном наборе данных (BL).

**Методы оценки:** Опросник чувствительности к наказанию и чувствительности к вознаграждению (SPSRQ) использовался для оценки чувствительности к стимулам вознаграждения и наказания. Опросник интернет-игровой зависимости применялся для оценки уровня аддиктивных симптомов в контексте интернет-игр. Айовская

задача азартного выбора (IGT) использовалась для оценки поведения при принятии рискованных решений. Данные функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) в состоянии покоя были предварительно обработаны с использованием стандартных конвейеров и проанализированы на основе шаблона парцелляции семи сетей Йео, с особым акцентом на лимбическую сеть (ЛС) и паттерны её функциональной связности. Статистический анализ включал корреляцию Спирмена, моделирование структурными уравнениями и кросс-лаговые панельные модели.

**Результаты:** Поперечный анализ выявил, что итоговый балл по задаче IGT отрицательно связан с чувствительностью к вознаграждению (ЧВ,  $\rho = -0,181$ ,  $p = 0,022$ ), которая, в свою очередь, положительно связана с чувствительностью к наказанию (ЧН,  $\rho = 0,125$ ,  $p < 0,001$ ). ЧН положительно предсказывала склонность к ИИЗ ( $\beta = 0,180$ ,  $p < 0,001$ ). Кроме того, сила лимбической сети демонстрировала положительную корреляцию с ЧВ ( $\rho = 0,077$ ,  $p < 0,001$ ) и отрицательную корреляцию с ЧН ( $\rho = -0,045$ ,  $p = 0,090$ ). Более того, сила функциональной связности между ЛС и другими функциональными сетями положительно ассоциировалась с ЧВ. Лонгитюдный анализ показал, что: (1) итоговый балл по задаче IGT в первый момент времени (Т1) отрицательно предсказывал ЧВ во второй момент времени (Т2,  $\beta = -0,123$ ,  $p = 0,031$ ); (2) ЧВ в Т1 положительно предсказывала склонность к ИИЗ в Т2 ( $\beta = 0,100$ ,  $p = 0,019$ ); (3) ЧН в Т1 отрицательно предсказывала ЧВ в Т2 ( $\beta = 0,085$ ,  $p = 0,056$ ); и (4) сила ЛС в Т1 напрямую предсказывала ЧВ и ЧН в Т1 (ЧВ:  $\beta = 0,126$ ,  $p = 0,027$ ; ЧН:  $\beta = -0,104$ ,  $p = 0,064$ ), а также ЧВ в Т2 ( $\beta = 0,079$ ,  $p = 0,080$ ).

**Выводы:** Итоговый балл по интернет-игровой деятельности, по-видимому, отрицательно коррелирует с чувствительностью к вознаграждению. Чувствительность к наказанию, по-видимому, положительно коррелирует со склонностью к интернет-игровой деятельности. Наблюдается положительная корреляция между чувствительностью к вознаграждению и чувствительностью к наказанию.

**Ключевые слова:** функциональная магнитно-резонансная томография (фМРТ), склонность к интернет-игровой зависимости, лимбическая сеть, чувствительность к наказанию, чувствительность к вознаграждению, принятие рискованных решений

---

## Введение

Интернет-игры приобрели широкую популярность во многих обществах [1]. Несмотря на возможные преимущества видеоигр, их использование может быть высоко вознаграждающим, что приводит к чрезмерному увлечению и развитию аддиктивных симптомов, связанных с видеоиграми [2, 3]. Вследствие этого концепция интернет-игровой зависимости (ИИЗ) привлекает всё большее внимание. ИИЗ представляет собой форму поведенческой аддикции, характеризующуюся дезадаптивной зависимостью от интернет-игр, которая проявляется в типичных симптомах зависимости, таких как доминирование, толерантность, внутренний

конфликт, неспособность прекратить игру и потеря контроля [4, 5]. Данная проблема особенно распространена среди подростков в силу продолжающегося психологического развития, что делает их более уязвимыми к привлекательности и негативным последствиям интернет-игр [6]. Исследования показывают, что ИИЗ не только неблагоприятно влияет на психическое здоровье, потенциально приводя к таким проблемам, как тревожность и депрессия [7, 8], но также изменяет функции и структуру мозга [9, 10]. Тем не менее, поскольку ИИЗ не имеет формального диагноза с чёткими пороговыми значениями и консенсусными критериями, мы, следуя предшествующим исследованиям, рассматриваем её как континуальную конструкцию — склонность к ИИЗ [11–13]. Такой подход позволяет избежать преждевременной диагностики по непроверенным стандартам и способствует выявлению нейронных и поведенческих коррелятов до развития полноценной ИИЗ, поддерживая усилия по раннему вмешательству.

В данном исследовании мы стремимся понять, как разворачивается склонность к ИИЗ, фокусируясь на чувствительности к вознаграждению и чувствительности к наказанию как ключевых механизмах, лежащих в основе аддиктивного поведения. Это обусловлено тем, что аддиктивное поведение, включая интернет-зависимые формы поведения, может формироваться через ошибочную оценку вознаграждения и наказания [14, 15]. Чувствительность к вознаграждению и чувствительность к наказанию влияют на реакцию индивида на позитивные или негативные стимулы соответственно [16, 17]. Эти виды чувствительности также тесно связаны с принятием решений в условиях риска [18], что также является одной из причин аддиктивного поведения [19]. Действительно, лица с ИИЗ часто демонстрируют слабый импульсный контроль, высокий уровень психологического дистресса и когнитивный дефицит, включая нарушения способности к принятию решений, характеризующиеся ослабленным когнитивным контролем, предпочтением немедленного вознаграждения и игнорированием потенциального наказания [11]. Согласно теории чувствительности к подкреплению (RST) [20, 21], поведенческие тенденции индивида модулируются уровнем его чувствительности к вознаграждению и наказанию. Применительно к видеоиграм повышенная чувствительность к вознаграждению может усиливать мотивацию к игровым достижениям, тогда как сниженная чувствительность к наказанию может ослаблять осознание негативных последствий, поддерживая аддиктивное поведение [11, 22, 23].

Важно отметить, что лимбическая сеть (ЛС) модулирует подобные виды чувствительности и рискованное поведение. Она осуществляет это через свои ключевые функции: регуляцию эмоций, формирование памяти и обработку вознаграждения [24]. Динамически взаимодействуя с другими сетями, ЛС играет решающую роль в формировании ИИЗ [25, 26]. ЛС включает ключевые области мозга, участвующие в обработке вознаграждения, регуляции эмоций и мотивации, такие как префронтальная кора, поясная кора, комплекс миндалевидных ядер, лимбический таламус, гиппокампальная формация и прилежащее ядро [27, 28]. Следовательно, изменения функциональной связности внутри ЛС могут

способствовать чрезмерной чувствительности к игровым сигналам вознаграждения [29]. Паттерны нейронной активности в стриатуме и связанных с ним областях ЛС различаются при обработке сигналов наказания (потери) и вознаграждения (прибыли) [30], что указывает на подсознательную обработку этих сигналов и их трансформацию в поведенческую мотивацию через специфические области мозга, такие как стриатум и миндалина [31]. Более того, взаимодействие паттернов функциональной связности между ЛС и сетью значимости (включающей преимущественно островковую кору и переднюю поясную кору) влияет на мотивацию и когнитивные процессы, что также может воздействовать на аддиктивное поведение [32]. Нарушения функциональной связности сети вознаграждения, в частности вентрального стриатума, с сетью когнитивного контроля (опосредованной префронтальной корой) могут приводить к дисбалансу между стремлением к вознаграждению и поведенческим контролем у лиц с игровыми расстройствами [33]. Таким образом, аномалии в ЛС и её межсетевых взаимодействиях могут представлять собой важные характеристики нейрофенотипа ИИЗ.

Несмотря на существующие исследования, связывающие чувствительность к вознаграждению и наказанию, принятие рискованных решений и ИИЗ, в нашем понимании интерактивных механизмов и нейронных основ этих взаимосвязей остаются пробелы. Большинство проведённых до сих пор исследований использовали поперечные дизайны с отдельным акцентом на поведенческие или нейронные механизмы, что ограничивает возможность формирования более детализированной модели «мозг–поведение» вклада чувствительности к вознаграждению/наказанию в формирование ИИЗ. Настоящее исследование направлено на восполнение этого пробела путём изучения того, как чувствительность к вознаграждению и наказанию наряду с принятием рискованных решений влияют на склонность к ИИЗ у студентов, а также на изучение лежащих в основе нейронных механизмов. Используя лонгитюдный дизайн, мы отслеживаем поведенческие изменения у здоровых молодых взрослых и анализируем их динамическую взаимосвязь с риском ИИЗ. В конечном счёте, данное исследование стремится раскрыть сложное взаимодействие между этими факторами, предлагая прочную теоретическую и эмпирическую основу для понимания и преодоления склонности к ИИЗ. Основываясь на предшествующих исследованиях, мы выдвигаем гипотезу о положительной ассоциации между чувствительностью к вознаграждению и наказанию как с принятием рискованных решений, так и со склонностью к ИИЗ. Кроме того, ожидается положительная ассоциация между принятием рискованных решений и склонностью к ИИЗ. Более того, мы предполагаем, что внутренняя связность ЛС, а также её функциональная связность с другими мозговыми сетями будут положительно ассоциированы с чувствительностью к вознаграждению, склонностью к риску и склонностью к ИИЗ, но отрицательно коррелировать с чувствительностью к наказанию. Исследовательская схема представлена на Рисунке 1.

---

## **Методы**

### **Участники**

Студенты университетов набирались через объявления на специализированных общедуниверситетских онлайн-платформах для рекрутинга, а также посредством размещения плакатов. Исследование было представлено как онлайн-опрос и 8-минутное сканирование методом функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) в состоянии покоя. Сбор данных проходил с сентября 2019 года по декабрь 2020 года (момент времени T1). После исключения участников с неполными ответами в анкетах или некачественными данными сканирования (выявленными путём визуальной проверки качества сканирования или избыточных движений головы, определяемых как среднее смещение >2 мм или более 30% «очищенных» временных точек), в поведенческо-нейровизуализационный поперечный набор данных (BBC) было включено 1142 участника. С октября 2021 года по декабрь 2022 года (момент времени T2) было проведено повторное обследование подвыборки участников из набора данных BBC. Из 338 лиц, с которыми удалось связаться повторно, 303 соответствовали критериям качества данных и были включены в поведенческий лонгитюдный набор данных (BL). Исследование было одобрено локальным этическим комитетом, и все участники предоставили письменное информированное согласие до начала участия.

### **Поведенческие методы оценки**

#### **Опросник чувствительности к наказанию и чувствительности к вознаграждению (SPSRQ)**

Опросник SPSRQ [17] применялся для оценки индивидуальной чувствительности к стимулам вознаграждения и наказания. Данная шкала включает два измерения: чувствительность к вознаграждению (ЧВ), оценивающую уровень мотивации и стремление к вознаграждению; и чувствительность к наказанию (ЧН), измеряющую тревожность и поведение избегания в ответ на сигналы наказания. Опросник состоит из 48 пунктов, на которые респонденты отвечают «да» или «нет». В данном исследовании альфа Кронбаха для шкалы ЧВ составила 0,704, а для ЧН — 0,821 в выборке BBC; в выборке BL эти значения составили 0,760 для ЧВ и 0,861 для ЧН. Данные показатели свидетельствуют о приемлемой надёжности и стабильности качества данной шкалы в разные моменты времени и в разных выборках.

#### **Опросник интернет-игровой зависимости**

Для оценки уровня аддиктивных симптомов в контексте интернет-игр использовался опросник, разработанный Чжоу и Яном [34]. Он включает восемь пунктов с пятибалльной шкалой Лайкерта (оценка от 1 до 5), что даёт максимально возможный суммарный балл 40. Более высокие баллы отражают более сильную склонность к ИИЗ. В данном исследовании альфа Кронбаха для данного опросника составила 0,913 в выборке BBC и 0,928 в выборке BL, что свидетельствует о приемлемой

надёжности и стабильности качества шкалы в разные моменты времени и в разных выборках.

### **Айовская задача азартного выбора (IGT)**

Задача IGT [35] была разработана для изучения поведения при принятии решений в условиях риска и неопределённости. В данной задаче участникам предлагается многократно выбирать из четырёх колод карт, причём каждый выбор приводит к уникальной комбинации вознаграждений и потерь. В частности, колоды высокого риска (A и B) обеспечивают более крупные немедленные выигрыши, но сопровождаются более существенными долгосрочными потерями, тогда как колоды низкого риска (C и D) приносят меньшие краткосрочные выгоды, но ведут к более стабильным и благоприятным долгосрочным результатам. Задача IGT состоит из 100 проб. После каждой пробы предоставляется немедленная обратная связь о сумме выигранных или проигранных денег. Задача IGT широко используется для изучения когнитивных и нейронных механизмов, лежащих в основе принятия рискованных решений [36].

### **Сбор нейровизуализационных данных**

Все участники данного исследования прошли сканирование методом фМРТ в состоянии покоя продолжительностью 8 минут с использованием 3-тесла сканера PRISMA (Siemens, Эрланген, Германия). Участникам было предложено держать глаза открытыми и ни о чём не думать во время сканирования. Для получения 240 функциональных объёмов использовалась последовательность градиентного эхо-планарного изображения. Параметры сканирования: время повторения (TR) = 2000 мс, время эха (TE) = 30 мс, поле зрения (FOV) =  $224 \times 224 \text{ мм}^2$ , угол поворота (FA) =  $90^\circ$ , количество срезов = 62, толщина среза = 2 мм, зазор между срезами = 0,3 мм, размер вокселя =  $2 \times 2 \times 2 \text{ мм}^3$ . Кроме того, для получения высокоразрешающих T1-взвешенных структурных изображений использовалась последовательность MPRAGE (magnetization prepared rapid acquisition gradient echo). Параметры сканирования: TR = 2530 мс, TE = 2,98 мс, FOV =  $224 \times 256 \text{ мм}^2$ , матрица разрешения =  $448 \times 512$ , FA =  $7^\circ$ , количество срезов = 192, толщина = 1,0 мм, время инверсии = 1100 мс, размер вокселя =  $0,5 \times 0,5 \times 1 \text{ мм}^3$ .

### **Предварительная обработка данных фМРТ**

Предварительная обработка данных фМРТ проводилась с использованием пакетов SPM12 и CONN 20.b. Этапы включали временную синхронизацию, коррекцию деформации на основе поля и коррекцию движений. После этих коррекций выполнялась пространственная нормализация для согласования высокоразрешающих анатомических изображений отдельных участников с функциональными изображениями. Затем эти изображения сегментировались на области, включающие серое вещество, белое вещество, ликвор и т.д. Сегментированные изображения нормализовывались в пространство Монреальского неврологического института (MNI) с использованием рабочего

процесса Dartel, после чего сглаживались ядром с полной шириной на полувысоте (FWHM) 6 мм. Процесс удаления шума включал регрессию параметров движения головы с использованием 24-параметрической модели Фристон [37], которая включает шесть параметров движения, их производные и квадратичные члены. Применялась процедура «очистки» (scrubbing) на основе покадрового смещения (FD > 0,5 мм), при этом помеченные объёмы и соседние временные точки моделировались как мешающие регрессоры [38]. Дальнейшее удаление индивидуальных физиологических шумов и артефактов движения головы осуществлялось с использованием метода aCompCor [39], который извлекает первые пять главных компонент из сигналов белого вещества и ликвора. Затем данные подвергались линейному детрендингу и полосовой фильтрации (0,008–0,09 Гц).

### **Статистический анализ**

Вся предварительная обработка поведенческих данных и соответствующие анализы проводились с использованием R 4.3.3 (R Foundation for Statistical Computing, Вена, Австрия). Моделирование структурными уравнениями (SEM) и панельные кросс-лаговые модели строились с использованием Mplus 8.3 для выборок BBC и BL. Горизонтальная модель анализирует одновременные ассоциации с использованием поперечных межсубъектных данных в один момент времени. В отличие от неё, вертикальная модель исследует динамические изменения и лаговые причинно-следственные эффекты с использованием лонгитюдных внутрисубъектных данных в несколько моментов времени. Качество соответствия модели оценивалось с использованием отношения хи-квадрат к числу степеней свободы ( $\chi^2/\text{ст.св.}$ ), сравнительного индекса соответствия (CFI), индекса Такера–Льюиса (TLI), среднеквадратичной ошибки аппроксимации (RMSEA) и стандартизованного среднеквадратичного остатка (SRMR). Значение  $\chi^2/\text{ст.св.}$  ниже 3 указывает на приемлемое соответствие. Значения CFI и TLI выше 0,90 свидетельствуют о хорошем соответствии. Значения RMSEA ниже 0,05 указывают на близкое соответствие, а значения SRMR ниже 0,08 — на хорошее соответствие. Комбинация сильных значений RMSEA (<0,05) и CFI (>0,95) особенно полезна для оценки качества соответствия [40]. Возраст и пол включались в качестве ковариат во все модели.

Для данных фМРТ матрицы функциональной связности всего мозга вычислялись с использованием GRETNA 2.0.0 на основе шаблона AAL90 [41]. Затем в данном исследовании весь мозг разделялся на семь функциональных сетей на основе метода парцелляции сетей, предложенного Йео и соавт. [42]: зрительная сеть (ЗС), соматомоторная сеть (СМС), дорсальная сеть внимания (ДСВ), вентральная сеть внимания (ВСВ), лимбическая сеть (ЛС), фронтально-париетальная сеть (ФПС) и сеть пассивного режима работы мозга (СПР). Мы использовали шаблон AAL90 для delineation областей мозга и рассчитывали силу ЛС, а также силу функциональной связности между ЛС и остальными шестью сетями. Анализ данных проводился с использованием MATLAB 2023a. Впоследствии корреляция между силой ЛС, силой функциональной связности ЛС с оставшимися шестью сетями и поведенческими

переменными анализировалась с использованием R 4.3.3. Для контроля потенциальных ложноположительных результатов, возникающих вследствие множественных сравнений, применялась процедура коррекции уровня ложных открытий (FDR) для корректировки р-значений всех соответствующих анализов и моделей, проведённых в данном исследовании. Возраст и пол включались в качестве контрольных переменных в корреляционные анализы и моделирование структурными уравнениями.

Наконец, сила ЛС интегрировалась в моделирование структурными уравнениями (SEM) и панельные кросс-лаговые модели для выявления лежащих в основе поведения нейронных механизмов. Статистическая значимость определялась при двустороннем пороговом значении  $\alpha = 0,05$ . Исследовательские вопросы и планы статистического анализа для данного исследования не были предварительно зарегистрированы в общедоступном репозитории до начала анализа данных. Соответственно, представленные здесь результаты следует интерпретировать как разведочные.

---

## **Результаты**

### **Поведенческие результаты**

#### **Характеристики участников**

В выборке BBC было включено 1142 участника (360 мужчин и 782 женщины) со средним (стандартное отклонение) возрастом 18,75 (1,67) года. Их средний (СО) балл по шкале ЧВ составил 12,90 (3,75), по шкале ЧН — 13,86 (4,87), итоговый балл по задаче IGT — -5,21 (20,76), а балл по шкале ИИЗ — 13,82 (6,04). В выборке VL было проведено повторное обследование 303 участников (71 мужчина и 232 женщины) со средним (СО) возрастом на исходном уровне 18,84 (1,72) года. На исходном уровне средний (СО) балл участников по шкале ЧВ составил 12,61 (3,60), по шкале ЧН — 14,44 (4,61), итоговый балл по задаче IGT — -3,88 (19,62), а балл по шкале ИИЗ — 13,81 (6,19). При повторном обследовании значения составили: ЧВ — 12,13 (4,09), ЧН — 14,07 (5,41), итоговый балл IGT — -1,93 (23,03), балл ИИЗ — 15,76 (7,00). Кроме того, сравнения между выборками BBC и VL по поведенческим показателям выявили, что в выборке VL достоверно более низкие значения ЧВ ( $t = -3,133$ ,  $p = 0,002$ ), более высокие итоговые баллы по задаче IGT ( $t = 2,383$ ,  $p = 0,017$ ) и более высокие баллы по шкале ИИЗ ( $t = 4,796$ ,  $p < 0,001$ ) по сравнению с выборкой BBC, тогда как достоверных различий по показателю ЧН не наблюдалось ( $t = 0,649$ ,  $p = 0,516$ ).

#### **Корреляционный анализ поведенческих переменных**

Корреляции представлены на Рисунке 2. Диагональные графики плотности указывают на то, что поведенческие переменные не распределены нормально. Следовательно, применялись корреляционные анализы Спирмена. В выборке BBC ЧВ положительно коррелировала с ЧН ( $\rho = 0,125$ ,  $p < 0,001$ ) и отрицательно — с итоговым баллом (НС,

$\rho = -0,181$ ,  $p = 0,022$ ), тогда как ЧН положительно коррелировала со склонностью к ИИЗ ( $\rho = -0,068$ ,  $p < 0,001$ ). В выборке VL ЧВ в момент времени T1 положительно коррелировала с ЧН в T1 ( $\rho = 0,164$ ,  $p = 0,004$ ), а также с ЧВ в T2 ( $\rho = 0,604$ ,  $p < 0,001$ ), ЧН в T2 ( $\rho = 0,224$ ,  $p < 0,001$ ) и склонностью к ИИЗ в T2 ( $\rho = 0,162$ ,  $p = 0,005$ ). ЧН в T1 положительно коррелировала со склонностью к ИИЗ в T1 ( $\rho = 0,134$ ,  $p = 0,02$ ), а также с ЧВ в T2 ( $\rho = 0,195$ ,  $p < 0,001$ ), ЧН в T2 ( $\rho = 0,672$ ,  $p < 0,001$ ) и склонностью к ИИЗ в T2 ( $\rho = 0,153$ ,  $p = 0,008$ ). HC в T1 отрицательно коррелировала с ЧВ в T2 ( $\rho = -0,133$ ,  $p = 0,021$ ), но положительно — с HC в T2 ( $\rho = 0,231$ ,  $p < 0,001$ ) и склонностью к ИИЗ в T2 ( $\rho = 0,153$ ,  $p = 0,008$ ). Склонность к ИИЗ в T1 положительно коррелировала с ЧН в T2 и склонностью к ИИЗ в T2 ( $\rho = 0,122$ ,  $p = 0,034$ ;  $\rho = 0,525$ ,  $p < 0,001$ ). Кроме того, ЧВ в T2 положительно коррелировала с ЧН в T2 ( $\rho = 0,371$ ,  $p = 0,021$ ) и склонностью к ИИЗ в T2 ( $\rho = 0,121$ ,  $p = 0,036$ ). ЧН в T2 отрицательно коррелировала с HC в T2 ( $\rho = 0,118$ ,  $p = 0,041$ ), но положительно — со склонностью к ИИЗ в T2 ( $\rho = 0,190$ ,  $p < 0,034$ ).

### **Поведенческие модели с горизонтальной и вертикальной перспектив**

Для дальнейшего анализа взаимосвязей между поведенческими переменными в данном исследовании были построены горизонтальные и вертикальные поведенческие модели на основе результатов корреляционного анализа, как показано на Рисунке 3. Горизонтальная поведенческая модель (Рисунок 3а) продемонстрировала хорошее соответствие со следующими индексами:  $\chi^2/\text{ст.св.} = 1,419$ , CFI = 0,988, TLI = 0,979, RMSEA = 0,019 и SRMR = 0,021. Результаты указывают на то, что HC отрицательно предсказывала ЧВ ( $\beta = -0,060$ ,  $p = 0,058$ ), ЧВ положительно предсказывала ЧН ( $\beta = 0,147$ ,  $p < 0,001$ ), а ЧН положительно предсказывала склонность к ИИЗ ( $\beta = 0,180$ ,  $p < 0,001$ ). Вертикальная поведенческая модель (Рисунок 3б) также продемонстрировала хорошее соответствие со следующими индексами:  $\chi^2/\text{ст.св.} = 1,638$ , CFI = 0,943, TLI = 0,907, RMSEA = 0,046 и SRMR = 0,038. Результаты показывают, что HC в момент времени T1 отрицательно предсказывала ЧВ в момент времени T2 ( $\beta = -0,123$ ,  $p = 0,031$ ), тогда как ЧВ в момент времени T2 положительно предсказывала склонность к ИИЗ в момент времени T2 ( $\beta = 0,124$ ,  $p = 0,015$ ). Панельная кросс-лагговая модель для вертикальных поведенческих данных (Рисунок 3с) также продемонстрировала хорошее соответствие со следующими индексами:  $\chi^2/\text{ст.св.} = 1,808$ , CFI = 0,981, TLI = 0,961, RMSEA = 0,052 и SRMR = 0,029. Результаты выявляют, что ЧВ как в момент времени T1, так и в момент времени T2 положительно предсказывала склонность к ИИЗ через ЧН (все значения  $p < 0,05$ ), а авторегрессионные эффекты ЧВ, ЧН и склонности к ИИЗ были достоверными (все значения  $p < 0,001$ ). Примечательно, что ЧВ в момент времени T1 напрямую и положительно предсказывала склонность к ИИЗ в момент времени T2 ( $\beta = 0,100$ ,  $p = 0,019$ ), а ЧН в момент времени T1 положительно предсказывала ЧВ в момент времени T2 ( $\beta = 0,085$ ,  $p = 0,056$ ), что впоследствии влияло на ЧН и склонность к ИИЗ в момент времени T2.

### **Поведенческие и нейронные результаты**

## **Прогностические взаимосвязи между лимбической сетью и поведенческими исходами**

Для уточнения роли лимбической сети (ЛС) в ЧВ, ЧН и поведении при принятии рискованных решений в данном исследовании был проведён корреляционный анализ для изучения взаимосвязей между силой ЛС, силой функциональной связности между ЛС и шестью другими основными сетями (СПР, ДСВ, ФПС, СМС, ВСВ и ЗС), а также их ассоциаций с ЧВ, ЧН, НС и склонностью к ИИЗ в выборке ВВС. После коррекции на множественные сравнения (FDR) было установлено, что сила ЛС достоверно положительно коррелировала с ЧВ (Рисунок 4а,  $\rho = 0,077$ ,  $p < 0,001$ ) и демонстрировала маргинально значимую отрицательную корреляцию с ЧН (Рисунок 4с,  $\rho = -0,045$ ,  $p = 0,090$ ). Кроме того, сила функциональной связности между ЛС и СПР, ФПС, СМС, ВСВ и ЗС была положительно ассоциирована с ЧВ (Рисунок 4б), тогда как сила функциональной связности между ЛС и СПР, ФПС, ВСВ и ЗС демонстрировала маргинально значимые отрицательные корреляции с ЧН (Рисунок 4д). Однако достоверных ассоциаций между НС/склонностью к ИИЗ и силой ЛС, а также между НС/склонностью к ИИЗ и силой функциональной связности между ЛС и шестью другими основными сетями обнаружено не было. Подробные результаты представлены на Рисунке 4.

## **Моделирование «мозг–поведение» в выборках ВВС и ВЛ**

Для дальнейшего изучения потенциальных механизмов участия ЛС в поперечных и лонгитюдных поведенческих моделях в данном исследовании также были построены модели структурными уравнениями. На основе поведенческих моделей и результатов корреляционного анализа ЛС модели с низким соответствием и переменные (включая функциональную связность между ЛС и шестью другими основными сетями) были исключены. В выборке ВВС (Рисунок 5а) сила ЛС положительно предсказывала ЧВ ( $\beta = 0,057$ ,  $p = 0,055$ ) и отрицательно предсказывала ЧН ( $\beta = -0,071$ ,  $p = 0,015$ ). Индексы соответствия модели составили:  $\chi^2/\text{ст.св.} = 1,314$ , CFI = 0,990, TLI = 0,982, RMSEA = 0,017 и SRMR = 0,018. Дальнейший анализ выявил, что в выборке ВЛ (Рисунок 5б) сила ЛС в момент времени Т1 напрямую положительно предсказывала ЧВ в момент времени Т1 ( $\beta = 0,126$ ,  $p = 0,027$ ), отрицательно предсказывала ЧН в момент времени Т1 ( $\beta = -0,104$ ,  $p = 0,064$ ) и положительно предсказывала ЧВ в момент времени Т2 ( $\beta = 0,079$ ,  $p = 0,080$ ). Индексы соответствия модели составили:  $\chi^2/\text{ст.св.} = 1,489$ , CFI = 0,986, TLI = 0,973, RMSEA = 0,040 и SRMR = 0,030. Подробные результаты модели (путевые коэффициенты и р-значения) представлены на Рисунке 5.

---

## **Обсуждение**

В данном исследовании использовались как поперечный, так и лонгитюдный дизайны для изучения взаимосвязей между ЧВ, ЧН, принятием рискованных решений и склонностью к ИИЗ, а также для исследования нейронных основ (особенно ЛС) изменений ЧВ и ЧН. Данные поперечного анализа выявили

достоверную положительную корреляцию между ЧВ и ЧН, тогда как НС отрицательно коррелировала с ЧВ, а ЧН положительно коррелировала со склонностью к ИИЗ. Лонгитюдные данные дополнительно демонстрируют временную стабильность ЧВ и ЧН в разные моменты времени, а также их прогностическое влияние на склонность к ИИЗ. Нейровизуализационные анализы указали на то, что внутренняя сила связности ЛС и её функциональная связность с основными сетями, такими как СПР и ФПС, были достоверно положительно коррелированы с ЧВ, тогда как демонстрировали маргинально значимые отрицательные корреляции с ЧН. Кроме того, кросс-лаговые панельные модели подчеркнули потенциальную изменчивую роль силы ЛС в поведенческих чертах, поддерживая её критическую функцию в обработке вознаграждения и наказания.

Поведенческие результаты указывают на то, что ЧВ и ЧН играют ключевую роль в формировании склонности к ИИЗ. Положительная корреляция между ЧВ и ЧН предполагает, что индивиды с высокой ЧВ могут также быть более восприимчивы к сигналам наказания. Эта двойная чувствительность может приводить к тому, что они чрезмерно стремятся к игровым вознаграждениям, игнорируя при этом потенциальные негативные последствия своего игрового поведения. Согласно модели двух систем, ЧВ и ЧН могут ко-активироваться, отражая конфликт «приближение–избегание», который приводит индивидов к переживанию внутренней борьбы между привлекательностью вознаграждения и угрозой наказания [43]. Нарастающий конфликт между вознаграждениями и наказаниями может приводить к конфликту «приближение–избегание», который способен провоцировать тревожность и при этом всё же вести к рискованному поведению [44]. Выявленный факт, что способность к принятию рискованных решений отрицательно предсказывает ЧВ, дополнительно указывает на то, что дефицит в принятии рискованных решений может нарушать способность индивида оценивать негативные последствия игрового поведения, тем самым повышая риск ИИЗ [45, 46]. Лонгитюдные данные дополнительно раскрывают прогностическую роль ЧВ и ЧН в формировании склонности к ИИЗ в разные моменты времени. В частности, ЧВ в момент времени T1 достоверно положительно предсказывает склонность к ИИЗ в момент времени T2, тогда как ЧН в момент времени T1 косвенно влияет на склонность к ИИЗ в момент времени T2, положительно предсказывая ЧВ в момент времени T2. Это свидетельствует о том, что высокая ЧВ может напрямую стимулировать продолжающееся стремление индивида к игровым вознаграждениям, тогда как высокая ЧН может косвенно усугублять склонность к ИИЗ за счёт усиления ЧВ. Данные находки подчёркивают долгосрочное воздействие ЧВ и ЧН на формирование и поддержание склонности к ИИЗ, а также их динамические механизмы взаимодействия. Хотя прямая релевантная литература скудна, предшествующие исследования затрагивали данные аспекты [25, 47, 48]. Данный динамический механизм взаимодействия предоставляет новую перспективу для понимания мультифакторной модели, лежащей в основе ИИЗ.

Нейровизуализационные анализы указывают на то, что ЛС играет критическую роль в обработке вознаграждения и через это может повышать склонность к ИИЗ. Исследования выявили достоверную положительную корреляцию между внутренней силой связности ЛС и ЧВ, что, вероятно, отражает ключевую роль структур ЛС, таких как стриатум и миндалина, в обработке сигналов вознаграждения [49]. В частности, уровень активации в ЛС, особенно с вовлечением вентрального стриатума и орбитофронтальной коры, может влиять на ожидания и восприятие индивидом различных вознаграждений, делая его более склонным к стремлению к этим вознаграждениям при столкновении с искушениями [50]. Данный феномен особенно выражен среди подростков и молодых взрослых, коррелируя с их этапом нейроразвития и повышенной активностью их эмоциональных и вознаграждающих систем [51]. Кроме того, функциональная связность между ЛС и другими сетями, особенно СПР и ФПС, положительно коррелирует с ЧВ, подчёркивая их совместную роль в обработке вознаграждения [52, 53]. Дополнительно, моделирование структурными уравнениями показывает, что сила ЛС положительно предсказывает ЧВ и отрицательно предсказывает ЧН, что позволяет предположить, что внутренняя связность ЛС может косвенно влиять на риск ИИЗ через воздействие как на ЧВ, так и на ЧН. Это подчёркивает ключевую роль ЛС в обработке вознаграждения и системе вознаграждения [25, 54]. Следовательно, вмешательства, направленные на активность и связность ЛС посредством, например, нейробиоуправления и неинвазивной стимуляции мозга, могут способствовать нормализации цепей обработки вознаграждения. Дополнительно, когнитивно-поведенческая терапия может модулировать ЧВ и ЧН индивида для смягчения дезадаптивного игрового поведения. Раннее выявление повышенных черт чувствительности может способствовать профилактическим стратегиям. Интеграция нейробиологических и поведенческих подходов перспективна для повышения эффективности лечения ИИЗ.

### **Ограничения исследования**

Данное исследование имеет ряд ограничений, которые следует учитывать и расширять в будущих исследованиях. Во-первых, выборка в основном включала здоровых молодых людей. Хотя такой фокус позволяет выявить раннее начало механизмов ИИЗ, мы призываем к будущим исследованиям с участием клинических популяций, таких как пациенты с диагностированной ИИЗ, и различных возрастных групп для повышения обобщаемости и клинической релевантности. Во-вторых, в данном исследовании использовалась фМРТ в состоянии покоя, которая фиксирует общую связность мозга, но не нейронную активность во время выполнения специфических когнитивных задач. Будущие исследования могут включать фМРТ на основе задач для лучшего уточнения динамических нейронных механизмов ИИЗ. В-третьих, в данном исследовании панельные данные включали только два момента времени, что ограничивает углублённый анализ динамических взаимосвязей и возможность разделения внутрисубъектных изменений от стабильных межсубъектных различий. Будущие исследования должны использовать больше волн данных для применения методов, таких как модель кросс-лаговых панелей со

случайным интерцептом (RI-CLPM), что позволит более чётко разграничить стабильные черты и динамические изменения, тем самым усиливая причинный вывод. В-четвёртых, склонность к ИИЗ измерялась с использованием отечественного опросника, ориентированного на китайских подростков, что подходит для данного контекста, но фокусируется на субклиническом поведении, а не на клинической диагностике. Будущие исследования должны использовать международно признанные шкалы, такие как тест Internet Gaming Disorder-20 (IGD-20), для повышения точности измерений и кросс-культурной валидности. Кроме того, большинство корреляций и путей коэффициентов в данном исследовании невелики, поэтому практическую значимость следует интерпретировать с осторожностью. Тем не менее, эти тонкие ассоциации всё же предоставляют ценные инсайты в поведенческие и нейронные механизмы склонности к ИИЗ у здоровых студентов университетов. Будущие исследования должны использовать более крупные, разнообразные выборки и усовершенствованные методы для укрепления результатов.

---

## **Заключение**

В данном исследовании углублённо изучались сложные взаимосвязи между ЧВ, ЧН, принятием рискованных решений и склонностью к ИИЗ, а также нейронные основы данных поведенческих характеристик с акцентом на лимбическую сеть.

Поведенческие результаты указывают на то, что взаимодействие между ЧВ, ЧН и принятием рискованных решений может стимулировать прогрессирование ИИЗ. Нейровизуализационные анализы дополнительно подчёркивают критические функции ЛС в обработке вознаграждения и регуляции эмоций, предполагая, что её паттерны связности могут косвенно влиять на склонность к ИИЗ. Путём интеграции поведенческих и нейровизуализационных данных данное исследование расширяет номологическую сеть склонности к ИИЗ. Оно указывает на новый механизм «мозг–поведение» развития склонности к ИИЗ. Это расширение важно, поскольку раскрывает ключевые нейронные основы ЧВ и ЧН, указывая на возможные вмешательства, которые следует изучить в будущих исследованиях.

---

## **Вклад авторов**

**Цзинчжэнь Хэ:** Концептуализация (равный вклад); формальный анализ (ведущий); методология (равный вклад); написание — оригинальный черновик (ведущий).

**Хайчао Чжао:** Концептуализация (равный вклад); методология (равный вклад).

**Офир Турель:** Методология (равный вклад); написание — обзор и редактирование оригинального текста (поддерживающий вклад).

**Шуюэ Чжан:** Методология (равный вклад).

**Сюй Лэй:** Концептуализация (равный вклад).

**Цзян Цю:** Методология (равный вклад).

**Тинъюн Фэн:** Концептуализация (равный вклад); методология (равный вклад).

**Хун Чэнь:** Методология (равный вклад).

**Цинхуа Хэ:** Концептуализация (равный вклад); курирование данных (ведущий); получение финансирования (ведущий); методология (равный вклад); написание — обзор и редактирование оригинального текста (ведущий).

---

### **Благодарности**

Данная работа поддержана исследовательскими грантами Национального фонда естественных наук Китая (31972906), Фонда фундаментальных исследований центральных вузов (SWU2209235) и Пилотного плана инновационных исследований «2035» Юго-Западного университета (SWUPilotPlan006).