Секция «Психофизиология, нейронауки и искусственный интеллект»

Нейропластичность при принятии экономических решений в условиях активного выбора

Научный руководитель – Шестакова Анна Николаевна

Симова Алла Александровна
Выпускник (магистр)
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Факультет социальных наук, Москва, Россия
E-mail: aa-cond@yandex.ru

Абстракт —Нейроэкономика – новая область, объединяющая нейробиологию и экономическую теорию, – изучает процесс принятия решений и обучения с подкреплением. Основываясь на ранних российских и советских исследованиях, эта область изучает, как дофаминергические цепи оценивают и выбирают благоприятные варианты на основе сенсорных, мотивационных и когнитивных данных. Традиционные модели принятия решений часто не учитывают перцептивные изменения, связанные с обучением с подкреплением. Современные теории предполагают, что адаптивность сенсорной коры, на которую влияет подкрепление, играет критическую роль в принятии решений.

Наше исследование направлено на интеграцию сенсорной пластичности в нейроэкономические модели, обеспечивая комплексное понимание того, как опыт и повторяющееся поведение влияют на реорганизацию сенсорной коры и принятие решений. Мы разработали аудиоверсию однорукого бандита, напоминающего лотерею, чтобы изучить динамику обучения с подкреплением и ее связь с маркерами нейропластичности (ММН, Р3а и осцилляторная активность мозга).

В исследовании приняли участие 29 человек, которые выбирали между двумя аудиозакодированными вариантами с разной вероятностью вознаграждения. Данные ЭЭГ записывались и анализировались с помощью пользовательских скриптов Python и библиотеки MNE. Были проведены удаление артефактов и сегментация, при этом основное внимание уделялось электроду Cz из-за его значительного амплитудного выражения.

Анализ ANOVA с повторными измерениями выявил значительные различия в ответах на стандартные и девиантные звуки до и после игры, а также между звуками, кодирующими большие и малые потери. Эти результаты свидетельствуют о роли сенсорной нейропластичности в принятии решений и подчеркивают важность учета сенсорных изменений в моделях обучения с подкреплением. Это исследование углубляет наше понимание взаимодействия между сенсорным входом и обучением с подкреплением в формировании поведения.

Ключевые слова—one-arm bandit task, P2, decision-making, neuroplasticity, задача «однорукий бандит», Р2, принятие решений, нейропластичность

1) Введение

Нейроэкономика, относительно новая междисциплинарная область на стыке нейробиологии и экономической теории [7], возникла на основе фундаментальных исследований в российской и советской психофизиологии. Теории условного рефлекса Павлова и теория функциональных систем Анохина заложили основу для современных исследований в области принятия решений и нейробиологии обучения с подкреплением [16]. Современная нейроэкономика делает акцент на механистической модели, в которой специализированные дофаминергические нейронные цепи оценивают варианты и выбирают наиболее благоприятный из них, основываясь на различных сенсорных, мотивационных и когнитивных сигналах [18].

Ключевые области современных исследований в нейроэкономике включают понимание того, как формируются ассоциации «стимул – подкрепление», анализ динамики такого обучения и оценку его влияния на поведение и физиологические реакции. [10, 17] Исследования показали критическую роль дофаминергических нейронов в принятии решений и корректировке поведения. Кроме того, в когнитивных исследованиях подчеркивается адаптивность сенсорной коры в результате воздействия и повторных действий. [1, 6, 20, 21, 23] Однако классические модели принятия решений не в полной мере учитывают изменения восприятия на уровне сенсорного входа, связанные с обучением с подкреплением. [16]

Современная нейроэкономическая теория выделяет несколько этапов принятия решений [16]: формирование представления о задаче и контексте, оценка ожидаемой ценности вариантов поведения, сравнение вариантов, выполнение выбранного действия и извлечение уроков из полученных результатов для улучшения будущих решений. Большинство исследований посвящено этапу оценки, цель которых – понять, как организмы, от микроорганизмов до человека, оптимизируют свои стратегии выживания, прогнозируя потенциальные выгоды и вероятности различных вариантов.

Предыдущие исследования нейропластичности, связанные с принятием решений, особенно в отношении денежных стимулов, часто используют теорию ожидаемой полезности/ценности, которая объединяет размер и вероятность вознаграждения. [5, 19, 22] Однако практический процесс выбора между альтернативами является более сложным, как показали Канеман и Тверски. Несмотря на это, размер вознаграждения и вероятность его получения имеют решающее значение в основных экспериментальных сценариях. [12]

Хотя биологи и экономисты широко изучают нейробиологию ожидаемой полезности [4, 16], конкретные механизмы вычисления мозгом этих параметров остаются неясными.

Теория обучения с подкреплением формализует гибкое принятие решений, фокусируясь на ошибке предсказания – разнице между ожидаемым и фактическим результатом. Обратная связь позволяет людям корректировать свои прогнозы и выбирать варианты, основываясь на прошлом опыте и будущих ожиданиях. Недавние исследования также подчеркивают значение пластичности сенсорной коры, которая под влиянием подкрепления стимулов влияет на последующее поведение.

Несмотря на многочисленные исследования пластичности сенсорной системы, особенно слуховой, многие современные модели обучения с подкреплением не учитывают изменения в сенсорном входе. Однако данные свидетельствуют о том, что сенсорная нейропластичность играет определенную роль в принятии решений, причем адаптация сенсорной коры происходит даже при неосознанном распознавании стимулов. [1, 8, 14, 21, 23] Это требует создания модели принятия решений, включающей реорганизацию сенсорной информации в связи с результатами обучения.

Таким образом, интеграция сенсорной пластичности в нейроэкономические модели принятия решений может улучшить наше понимание того, как опыт и повторяющееся поведение влияют на реорганизацию сенсорной коры, что в конечном итоге сказывается на процессах принятия решений. Такой подход обеспечит более полное понимание динамического взаимодействия между сенсорным входом и обучением с подкреплением в формировании поведения.

В наших предыдущих исследованиях [2-4] изучалась нейропластичность, связанная со слуховым восприятием в мозге человека. В этом исследовании использовалась адаптированная версия задачи задержки денежного поощрения (MID) [13], в которой слуховые сигналы заменяли визуальные, чтобы изучить взаимосвязь стимула и подкрепления. С помощью электроэнцефалографии (ЭЭГ) было замечено, что обучение с подкреплением коррелирует с адаптивными изменениями в слуховой коре. Слуховая адаптация задачи

MID выявила повышенную нейронную активность и сенсорную пластичность, связанную с сигналами подкрепления. [15]

Регрессионный анализ показал положительную корреляцию между сенсорной пластичностью и процессами контроля, что позволяет предположить, что динамика ассоциативного обучения может предсказывать пластичность сенсорной коры. Примечательно, что когда задача MID включала денежные потери, наблюдалось увеличение негативности несоответствия (MMN) для слуховых сигналов, предсказывающих значительные потери. [2]

Несмотря на доказательства сенсорной пластичности коры головного мозга, вызванной обучением, современные модели обучения с подкреплением и принятия решений часто предполагают постоянный сенсорный вход. Исследования показывают, что сенсорная пластичность может быть вызвана повторным принятием решений, при этом раннее нейронное кодирование ожидаемого вознаграждения влияет на первоначальную сенсорную обработку.

В слуховой области исследования нейропластичности, вызванной обучением с подкреплением, ограничены, за исключением исследований, проведенных в НИУ «Высшая школа экономики». Задача MID, в первую очередь инструментальная задача обучения, лишена элементов выбора и точной оценки выполнения задачи, что крайне важно для моделей обучения, основанных на вознаграждении.

Мы разработали новую аудиоверсию лотереи – модифицированную задачу «однорукого бандита». Эта задача требует от участников выбирать между двумя аудиокодированными вариантами с разной вероятностью вознаграждения, что позволяет изучать динамику обучения с подкреплением.

Исследовалась связь между оперантным обучением и маркерами нейропластичности (MMN, P3a и осцилляторная активность мозга). Две сессии oddball-задачи, проведенные до и после модифицированной задачи «Однорукий бандит», были направлены на регистрацию электрофизиологических коррелятов нейропластических изменений, вызванных повторным принятием решений.

Мы создали новую аудиоверсию однорукого бандита, напоминающую лотерею. Участники должны были выбирать между двумя вариантами, каждый из которых имел определенный ожидаемый результат, что позволяло исследовать поведенческие паттерны при обучении с подкреплением (RL).

Новая задача преодолевает ограничения задачи MID, поскольку предполагает активный выбор со стороны участника.

Кроме того, задача позволяет исследовать динамику вызванных потенциалов в сценариях со смешанной обратной связью, что способствует пониманию механизмов обработки обратной связи в коре головного мозга. Это может способствовать оценке эффективности обучения и разработке новых методик в нейроэкономических исследованиях.

Мы создали новую аудиоверсию однорукого бандита, похожего на лотерею. Участники должны были выбрать один из двух вариантов, каждый из которых имел определенный ожидаемый результат, что позволило изучить поведенческие паттерны при обучении с подкреплением (RL). Эта адаптация позволила связать обучение и нейропластичность при активном выборе.

II. Методология

1) Участники

В исследовании приняли участие 29 человек, из них 14 мужчин и 15 женщин. Средний возраст участников составил 24 года. Все участники были правшами, имели нормальное или скорректированное зрение и не страдали нервно-психическими расстройствами.

2) Оборудование

Электроэнцефалограмма (ЭЭГ) регистрировалась с помощью установки из 32 актив-

ных электродов, расположенных по системе 10-20.

Референтом служило среднее значение с электродов 10 и 21, расположенных на ушах. Заземляющий электрод (земля) располагался на месте электрода Fpz. Дополнительно регистрировалась окулограмма с помощью электрода 27 под правым глазом и электрода 5 на внешнем углу левого глаза. Сопротивление электродов поддерживалось на уровне не более 10 кОм.

Запись проводилась с помощью усилителя BrainVision actiCHamp (Brain Products GmbH) при частоте дискретизации 500 Гц. Для устранения частоты электрических устройств применялся фильтр с выемкой 50 Гц, после чего данные подвергались дальнейшей фильтрации в диапазоне 1-40 Гц.

3) Стимулы

Стимульный материал состоял из набора из десяти звуков, которые были разделены на четыре блока. Эти звуки были созданы с помощью программы PRAAT специально для данного исследования. В каждом блоке звукам были присвоены определенные частоты.

В блоке 1 использовались частоты 272 Гц и 502 Гц, в блоке 2 – 381 Гц и 637 Гц, в блоке 3 – 325 Гц и 568 Гц, а в блоке 4 – 440 Гц и 711 Гц. Кроме того, в oddball-задаче до и после основной сессии использовались частоты 208 Гц и 772 Гц.

Каждый звук предъявлялся в течение 200 мс с громкостью 70 дБ, измеренной с помощью измерителя интенсивности звука.

4) Процедура

Игра состояла из четырех блоков. Первый блок включал в себя объяснение задания, затем следовали два блока игры, перерыв, еще два блока игры, и, наконец, объявлялись результаты. Каждый блок игры состоял из 25 испытаний. В начале эксперимента каждый участник получил инструкцию с описанием процедуры. В ходе испытаний испытуемый нажимал на клавиатуре кнопки «влево» или «вправо», чтобы выбрать один из вариантов звука. Сначала воспроизводились оба звука, после чего участник должен был выбрать нужный звук.

Участникам объясняли, что их выбор приведет к вычитанию определенного количества денег из первоначальной суммы.

Оставшаяся после каждого испытания сумма фиксировалась, и в конце эксперимента участникам в качестве вознаграждения вручались 10 случайно выбранных сумм. Если участники не делали выбор в течение пяти секунд, они теряли все деньги, с которыми начинали испытание. Кроме того, в инструкции было указано, что порядок звуков в каждом испытании может меняться.

Финансовые потери участника определялись выбранной кнопкой. Если кнопка указывала на большую сумму, то потери были равны случайно выбранной сумме из распределения со средним значением 5 рублей. И наоборот, если кнопка указывала на меньшую сумму, то убыток равнялся случайно выбранной сумме из распределения со средним значением 50 рублей.

Распределения потерь были сгенерированы с помощью скрипта Python, который создавал массивы денежных потерь в заданных диапазонах для каждого звука.

Рисунок 1. Схема денежной лотереи предполагает, что участник слышит два последовательных звука. Затем с помощью клавиш «вправо» или «влево» они выбирают один из двух вариантов, отображаемых на экране, представляющих первый или второй звук. Затем на экране отображается сумма проигранных денег, связанная с выбранным звуком.

Рисунок 2. Схема задачи oddball-task.

III. Результаты

Для анализа полученных данных ЭЭГ был использован пользовательский скрипт на языке Python с использованием библиотеки MNE. Данные были очищены от артефактов как вручную, так и алгоритмически с помощью алгоритма ICA. Затем данные были сегментированы в зависимости от стимулов.

Для детального анализа использовали среднюю величину компонентов на электроде Cz, так как этот канал демонстрировал наиболее выраженную амплитуду. Анализировались средние значения амплитуды в пределах соответствующего окна вызванных потенциалов (-200-800 мс).

Для оценки различий в амплитуде компонентов был проведен дисперсионный анализ с повторными измерениями (ANOVA). В анализ были включены следующие факторы: стимул/контроль, крупный проигрыш/мелкий проигрыш и до игры/после игры.

Анализ выявил значительные различия в ответах на стандартные и девиантные звуки до и после игры. Кроме того, значительные различия наблюдались между реакциями на звуки, кодирующие большие и малые потери.

Df
Sum Sq
Mean Sq
F value
Pr(>F)
loss
2
1.78e-10
8.919e-11
31.76
3.1e-14
***
Residuals
1485
4.17e-09
2.810e-12

Таблица 1: Результаты дисперсионного анализа. Различия в компонентах вызванных потенциалов в ответ на стандартный и девиантный звук перед выполнением задания.

Рисунок 3. Различия в компонентах вызванных потенциалов в ответ на стандартный и девиантный звук перед выполнением задания в отведении Cz.

Df
Sum Sq
Mean Sq
F value
Pr(>F)
loss
2
1.050e-10
5.272e-11
13.13
2.23e-06
***
Residuals

1485
5.962e-09
4.010e-12

Таблица 2: Результаты дисперсионного анализа. Различия в компонентах вызванных потенциалов в ответ на стандартный звук и девиантный звук после выполнения задания.

Рисунок 4. Различия в компонентах вызванных потенциалов в ответ на стандартный звук и девиантный звук после выполнения задания в отведении Cz.

Df
Sum Sq
Mean Sq
F value
Pr(>F)
loss
1
1.890e-10
1.889e-10
38.39
8.47e-10
***
Residuals
990
4.871e-09
4.920e-12

Таблица 3. Результаты дисперсионного анализа. Различия в компонентах вызванных потенциалов в ответ на стандартный звук и девиантный звук для контрольных слуховых стимулов.

Рисунок 5. Различия в компонентах вызванных потенциалов в ответ на стандартный звук и девиантный звук для контрольных слуховых стимулов в отведении Cz.

Df
Sum Sq
Mean Sq
F value
Pr(>F)
loss
1
4.530e-11
4.531e-11
22.27
2.71e-06
***
Residuals
990
2.015e-09
2.040e-12

Таблица 4: Результаты дисперсионного анализа. Различия в компонентах вызванных потенциалов в ответ на стандартный звук и девиантный звук для слуховых стимулов, кодирующих большие потери.

Рисунок 6. Различия в компонентах вызванных потенциалов в ответ на стандартный звук и девиантный звук для слуховых стимулов, кодирующих большие потери, в отведении Cz.

Df
Sum Sq
Mean Sq
F value
Pr(>F)
loss
1
4.700e-11
4.693e-11
14.32
0.000164
***
Residuals
990
3.246e-09
3.280e-12

Таблица 5. Результаты дисперсионного анализа. Различия в компонентах вызванных потенциалов в ответ на стандартный звук и девиантный звук для слуховых стимулов, кодирующих меньшие потери.

Рисунок 7: Различия в компонентах вызванных потенциалов в ответ на стандартный звук и девиантный звук для слуховых стимулов, кодирующих меньшие потери, в отведении Cz.

IV Обсуждение

Результаты показали, что изменения, связанные с распознаванием звуков, кодирующих большие денежные потери, были более выраженными, чем изменения, связанные с распознаванием звуков, кодирующих меньшие денежные потери. Другими словами, во время экономической игры с активным выбором респонденты обучались лучше распознавать звуки, которых они старались избегать, чтобы избежать финансовых потерь.

Результаты исследования показывают, что в ситуациях активного выбора и повторного принятия решений в игре «однорукий бандит» происходят изменения в слуховой коре головного мозга. Более того, величина этих изменений коррелирует с величиной денежного вознаграждения, кодируемого звуками.

Результаты исследования показали, что участники продемонстрировали способность различать звуки, кодирующие денежные потери, во время экономической игры с активным выбором. Вызванные потенциалы в ответ на звук, кодирующий меньшие потери, были более выражены, чем на звук, кодирующий большие потери. Этот вывод согласуется с результатами предыдущих исследований, которые показали, что участники лучше обучались различать сильно различающиеся потери. [2] Это отчасти объясняется теорией Канемана о снижении чувствительности к потерям. [11]

Для того чтобы полнее изучить процесс, мы намерены более детально проанализировать полученные данные, чтобы сравнить изменения вызванных потенциалов с поведенческими проявлениями обучения, а именно скоростью реакции и правильностью выбора.

С практической точки зрения, динамические характеристики обучения и их влияние на пластические изменения могут существенно помочь в понимании процесса обучения слуховой системы. Например, определенная степень продвижения необходима для разработки индивидуальных программ обучения, способствующих высокому уровню вовлеченности учащихся. Исследования показали, что быстрое освоение нового языка сопровождается пластическими изменениями в активности слуховой коры. Однако без понимания индивидуальных различий в динамике этих изменений невозможно определить точное время начала процесса и продолжительность упражнений, необходимых для эффективного обучения новым словам или звукам. Если динамика обучения с подкреплением может быть использована в качестве предиктора пластических изменений, то предложенная модель может быть использована для прогнозирования необходимой продолжительности упражнений для каждого человека. Кроме того, успешные результаты такого исследования могут стимулировать развитие нейротехнологических подходов к образованию, что становится особенно актуальным в условиях ускоряющейся роботизации и необходимости смены профессий, требующей непрерывного обучения все большего числа людей во всем мире.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 22-18-00660 (Нейрокомпьютерный механизм сенсорной пластичности).

Источники и литература

1) Y. I. Alexandrov, V. Klucharev, and M. Sams, ‘Effect of emotional context in auditory-cortex processing’, International Journal of Psychophysiology, vol. 65, no. 3, pp. 261–271, Sep. 2007, doi: 10.1016/j.ijpsycho.2007.05.004.
2) A. Gorin et al., ‘Cortical plasticity elicited by acoustically cued monetary losses: an ERP study’, Sci Rep, vol. 10, no. 1, p. 21161, Dec. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-78211-7.
3) E. Krugliakova et al., ‘The Monetary Incentive Delay (MID) Task Induces Changes in Sensory Processing: ERP Evidence’, Front. Hum. Neurosci., vol. 13, p. 382, Nov. 2019, doi: 10.3389/fnhum.2019.00382.
4) E. Krugliakova, V. Klucharev, T. Fedele, A. Gorin, A. Kuznetsova, and A. Shestakova, ‘Correlation of cue-locked FRN and feedback-locked FRN in the auditory monetary incentive delay task’, Exp Brain Res, vol. 236, no. 1, pp. 141–151, Jan. 2018, doi: 10.1007/s00221-017-5113-2.
5) A. Bandura, ‘Self-efficacy: Toward a unifying theory of behavioral change.’, Psychological Review, vol. 84, no. 2, pp. 191–215, 1977, doi: 10.1037/0033-295X.84.2.191.
6) E. S. Bromberg-Martin, M. Matsumoto, and O. Hikosaka, ‘Dopamine in Motivational Control: Rewarding, Aversive, and Alerting’, Neuron, vol. 68, no. 5, pp. 815–834, Dec. 2010, doi: 10.1016/j.neuron.2010.11.022.
7) P. W. Glimcher and A. Rustichini, ‘Neuroeconomics: The Consilience of Brain and Decision’, Science, vol. 306, no. 5695, pp. 447–452, Oct. 2004, doi: 10.1126/science.1102566.
8) O. E. Güler and K. M. Thomas, ‘Developmental differences in the neural correlates of relational encoding and recall in children: An event-related fMRI study’, Developmental Cognitive Neuroscience, vol. 3, pp. 106–116, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.dcn.2012.07.001.
9) T. A. Hare, C. F. Camerer, and A. Rangel, ‘Self-Control in Decision-Making Involves Modulation of the vmPFC Valuation System’, Science, vol. 324, no. 5927, pp. 646–648, May 2009, doi: 10.1126/science.1168450.

10) C. B. Holroyd and M. G. H. Coles, 'The neural basis of human error processing: Reinforcement learning, dopamine, and the error-related negativity.', Psychological Review, vol. 109, no. 4, pp. 679–709, Oct. 2002, doi: 10.1037/0033-295X.109.4.679.

11) D. Kahneman and A. Tversky, 'Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk', Econometrica, vol. 47, no. 2, p. 263, Mar. 1979, doi: 10.2307/1914185.

12) D. Kahneman and A. Tversky, 'Choices, values, and frames.', American Psychologist, vol. 39, no. 4, pp. 341–350, Apr. 1984, doi: 10.1037/0003-066X.39.4.341.

13) B. Knutson, A. Westdorp, E. Kaiser, and D. Hommer, 'FMRI Visualization of Brain Activity during a Monetary Incentive Delay Task', NeuroImage, vol. 12, no. 1, pp. 20–27, Jul. 2000, doi: 10.1006/nimg.2000.0593.

14) A. S. Persichetti, G. K. Aguirre, and S. L. Thompson-Schill, 'Value Is in the Eye of the Beholder: Early Visual Cortex Codes Monetary Value of Objects during a Diverted Attention Task', Journal of Cognitive Neuroscience, vol. 27, no. 5, pp. 893–901, May 2015, doi: 10.1162/jocn_a_00760.

15) D. B. Polley, E. E. Steinberg, and M. M. Merzenich, 'Perceptual Learning Directs Auditory Cortical Map Reorganization through Top-Down Influences', J. Neurosci., vol. 26, no. 18, pp. 4970–4982, May 2006, doi: 10.1523/JNEUROSCI.3771-05.2006.

16) A. Rangel, C. Camerer, and P. R. Montague, 'A framework for studying the neurobiology of value-based decision making', Nat Rev Neurosci, vol. 9, no. 7, pp. 545–556, Jul. 2008, doi: 10.1038/nrn2357.

17) Rescorla, R. A., Wagner, A. R. (1972). A theory of Pavlovian conditioning: Variations in the effectiveness of reinforcement and nonreinforcement. In A. H., Black,W. F. Prokasy, (Eds.), Classical conditioning II. New York: Appleton-Century-Crofts, 1972.

18) J. K. Rilling, B. King-Casas, and A. G. Sanfey, 'The neurobiology of social decision-making', Current Opinion in Neurobiology, vol. 18, no. 2, pp. 159–165, Apr. 2008, doi: 10.1016/j.conb.2008.06.003.

19) J. B. Rotter, J. E. Chance, and E. J. Phares, Applications of a Social Learning Theory of Personality. Holt, Rinehart and Winston, 1972.

20) W. Schultz, 'Behavioral Theories and the Neurophysiology of Reward', Annu. Rev. Psychol., vol. 57, no. 1, pp. 87–115, Jan. 2006, doi: 10.1146/annurev.psych.56.091103.070229.

21) T. J. Vickery, M. M. Chun, and D. Lee, 'Ubiquity and Specificity of Reinforcement Signals throughout the Human Brain', Neuron, vol. 72, no. 1, pp. 166–177, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.neuron.2011.08.011.

22) Von Neumann, J., & Morgenstern, O. (2007). Theory of games and economic behavior (60th anniversary ed). Princeton University Press.

23) J. R. Whitlock, A. J. Heynen, M. G. Shuler, and M. F. Bear, 'Learning Induces Long-Term Potentiation in the Hippocampus', Science, vol. 313, no. 5790, pp. 1093–1097, Aug. 2006, doi: 10.1126/science.1128134.

Иллюстрации

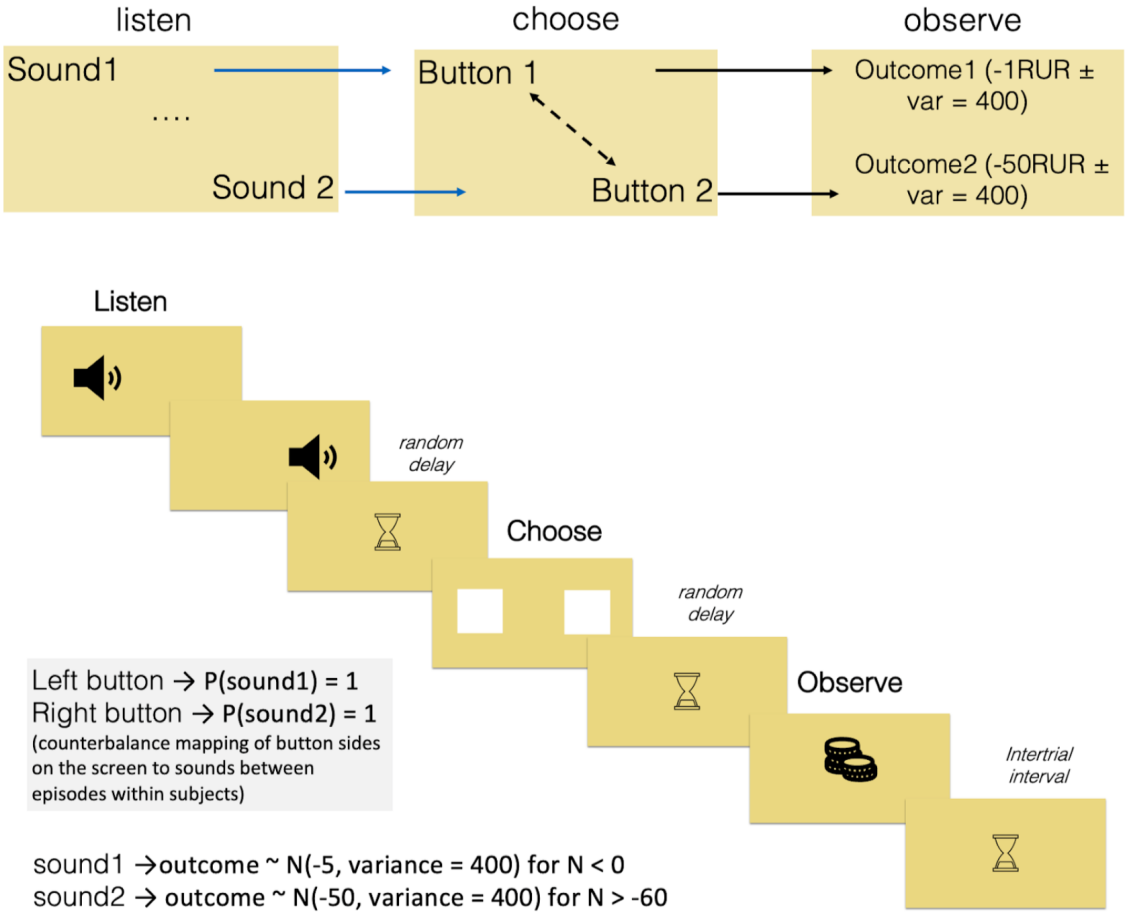

Рис. : 1. Схема денежной лотереи предполагает, что участник слышит два последовательных звука. Затем с помощью клавиш «вправо» или «влево» они выбирают один из двух вариантов, отображаемых на экране, представляющих первый или второй звук. Затем на экране отображается сумма проигранных денег, связанная с выбранным звуком.

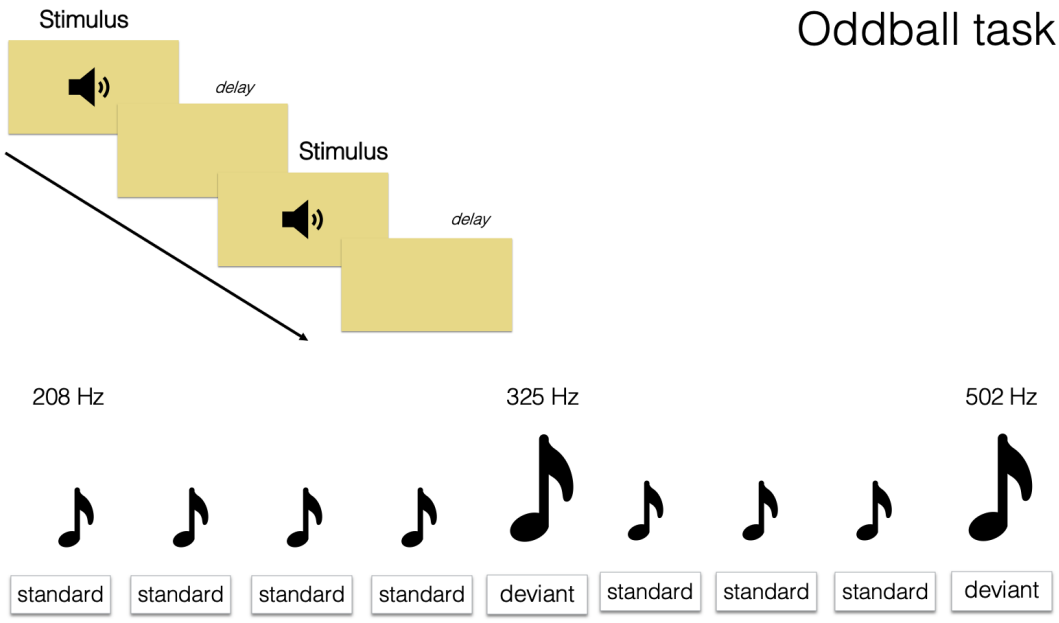

Рис. : 2. Схема задачи oddball-task.

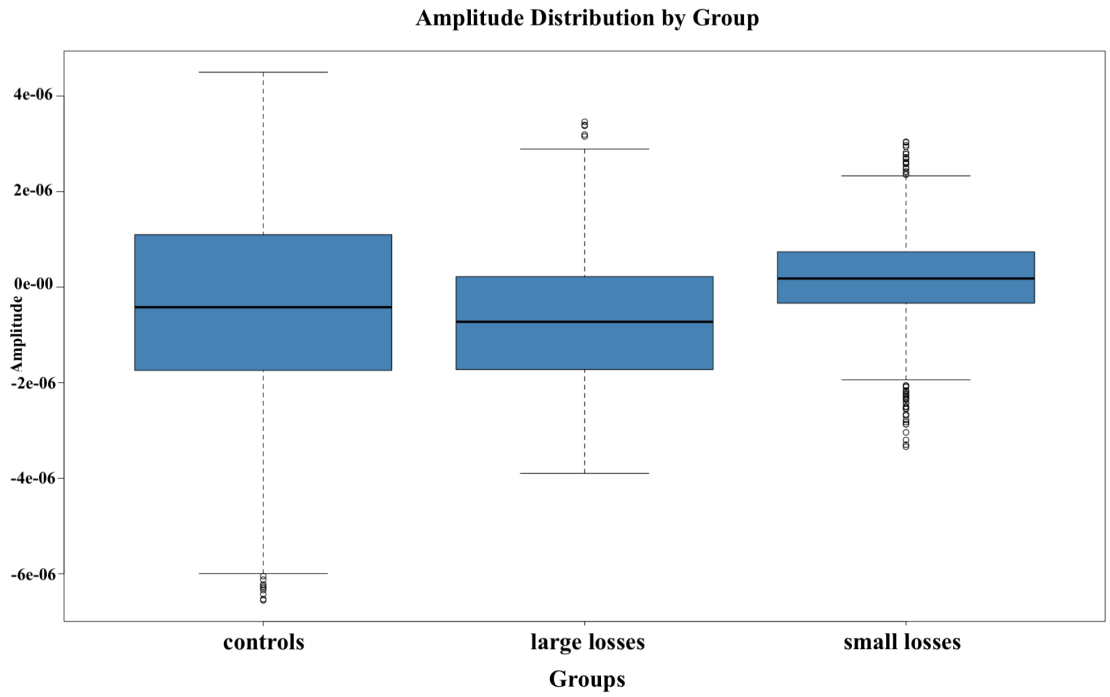

Рис. : 3. Различия в компонентах вызванных потенциалов в ответ на стандартный и девиантный звук перед выполнением задания в отведении Cz.

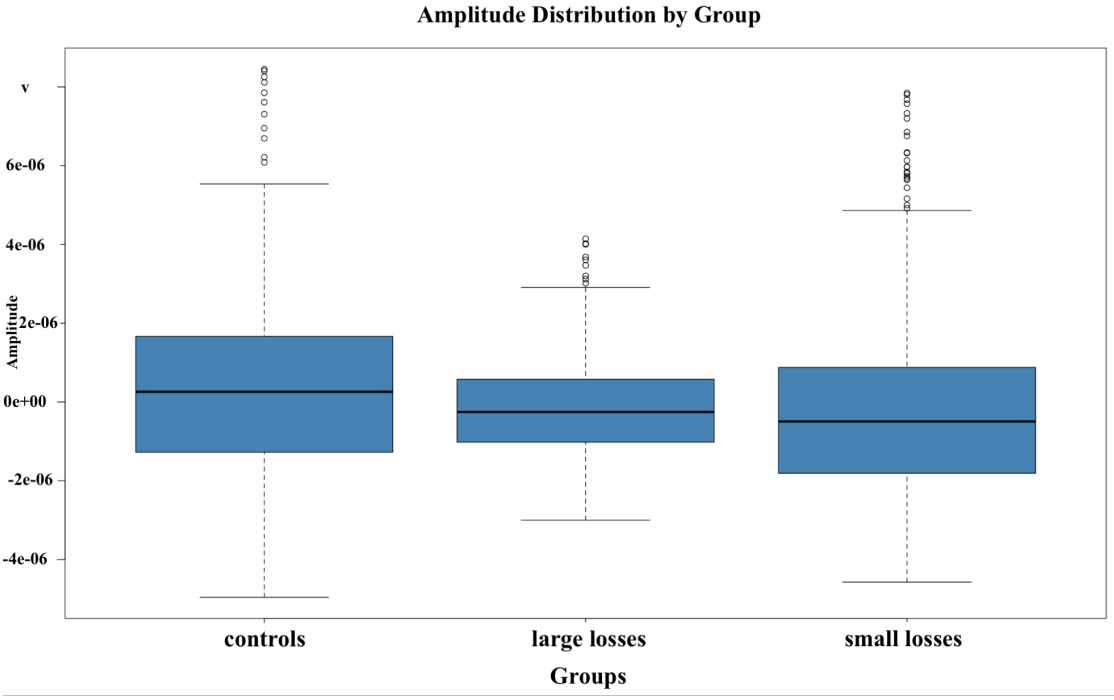

Рис. : 4. Различия в компонентах вызванных потенциалов в ответ на стандартный звук и девиантный звук после выполнения задания в отведении Cz.

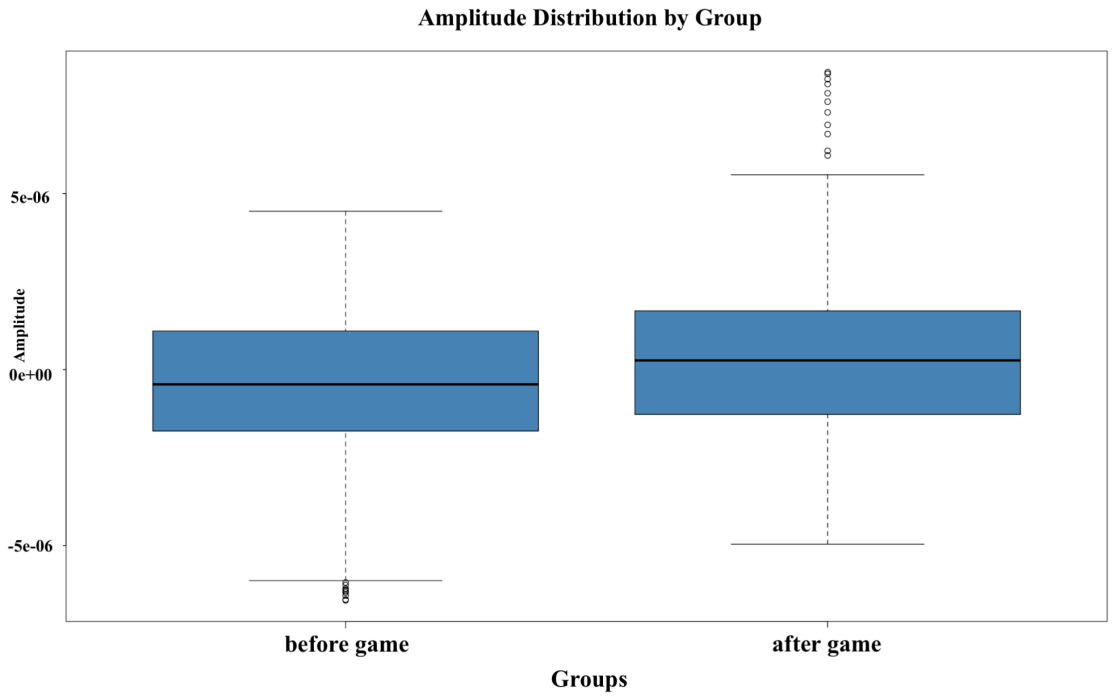

Рис. : 5. Различия в компонентах вызванных потенциалов в ответ на стандартный звук и девиантный звук для контрольных слуховых стимулов в отведении Cz.

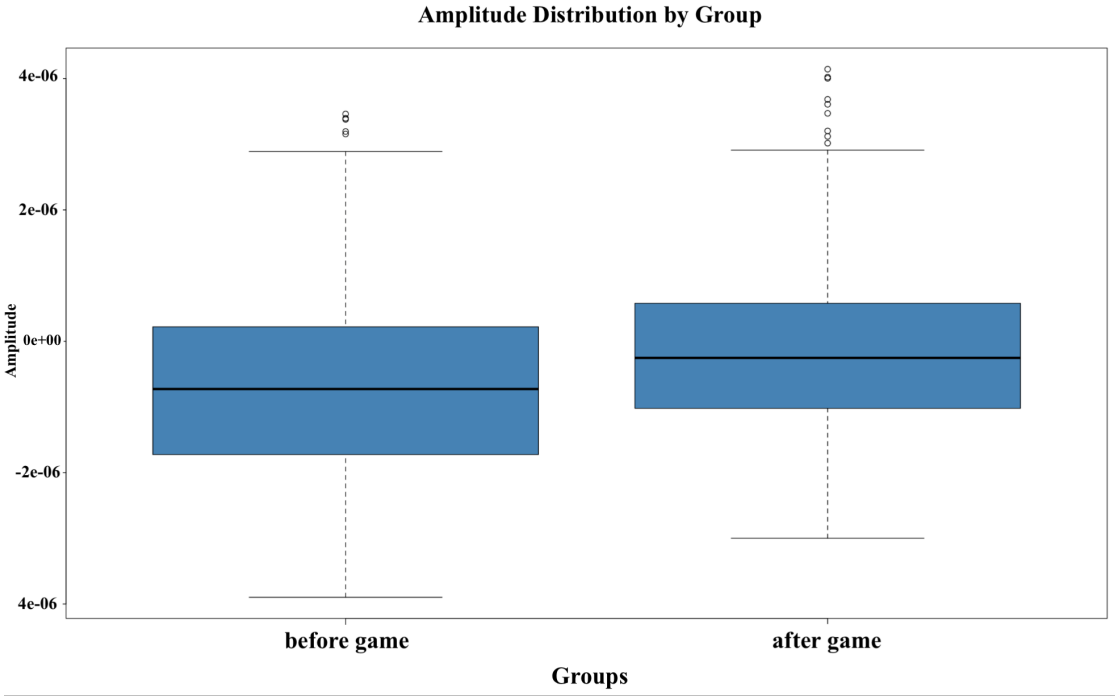

Рис. : 6. Различия в компонентах вызванных потенциалов в ответ на стандартный звук и девиантный звук для слуховых стимулов, кодирующих большие потери, в отведении Cz.

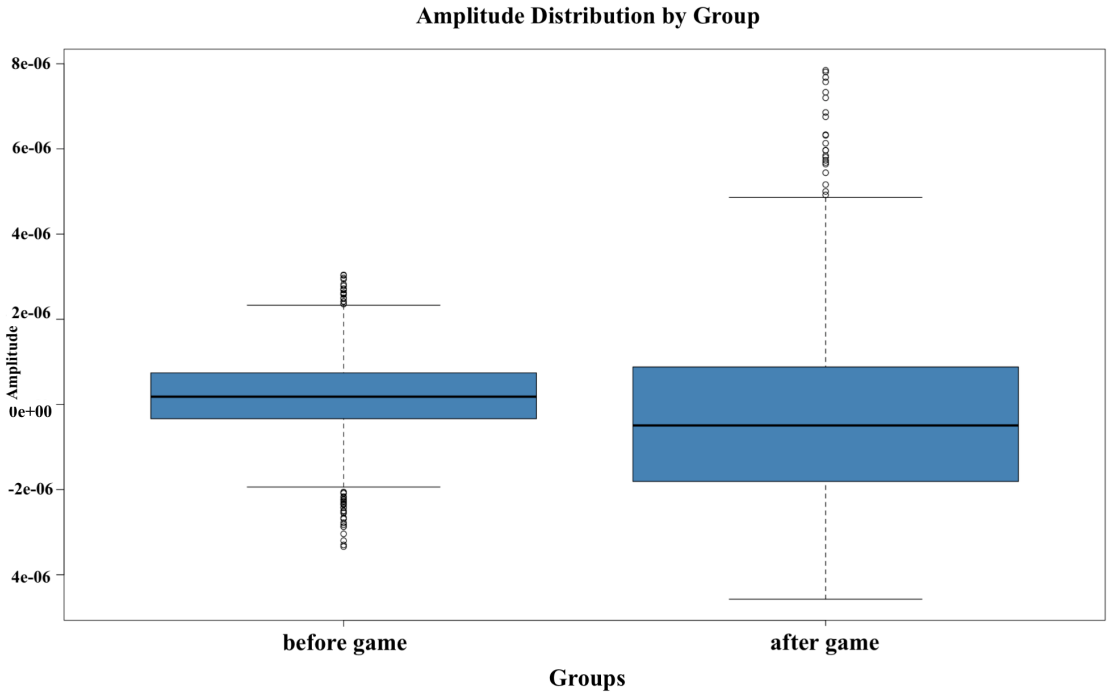

Рис. : 7: Различия в компонентах вызванных потенциалов в ответ на стандартный звук и девиантный звук для слуховых стимулов, кодирующих меньшие потери, в отведении Cz.