

Секция «28.21 Психофизиология, нейронауки и искусственный интеллект»

## Сетевые психофизиологические корреляты зрительной рабочей памяти и подвижного интеллекта

Научный руководитель – Кисельников Андрей Александрович

Демкина Е.И.<sup>1</sup>, Алексеева В.М.<sup>2</sup>

1 - Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Факультет психологии, Кафедра психофизиологии, Москва, Россия, E-mail: kininiki2001@gmail.com; 2 - Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Факультет психологии, Москва, Россия, E-mail: veronika.alekseeva2501@mail.ru

**Аннотация.** В работе применён сетевой анализ ЭЭГ для изучения связи функциональной организации мозга со зрительной рабочей памятью и подвижным интеллектом. Сетевые метрики оценивались на глобальном, среднем и локальном уровнях. Дополнительно была использована модель машинного обучения, статистически значимо предсказывающая уровень подвижного интеллекта, что подчёркивает прогностическую ценность сетевой архитектуры мозга.

**Цели:** 1. Корреляционно оценить связи сетевых метрик ЭЭГ с эффективностью зрительной рабочей памяти (ЗРП) на глобальном, среднем и локальном уровнях с учётом частотных диапазонов и порогов отсечения слабых связей. 2. Корреляционно оценить связи сетевых метрик ЭЭГ с уровнем подвижного интеллекта (ПИ) на глобальном, среднем и локальном уровнях в покое, при когнитивной нагрузке и при решении матриц Равена. 3. Построить и валидировать модель машинного обучения для прогнозирования ПИ по сетевым метрикам функциональной связности.

**Методы.** Записывали 60-канальную ЭЭГ в двух условиях: покой и когнитивная нагрузка (вычитание 1000–7 при открытых/закрытых глазах; решение матриц Равена; 2-back — при открытых глазах). Использовались задачи 2-back и Raven SPM Plus [2]. Источники (68 корковых ROI) реконструировались методом sLORETA. Функциональную связность оценивали по wPLI [3] в диапазонах 4–8, 8–13, 13–30 и 4–30 Гц. Корреляции рассчитывали по Спирмену.

**Сетевые метрики и ML.** Для анализа ЗРП и ПИ рассчитывались сетевые метрики: SWI, модульность, CC/Normal CC, CPL, локальная эффективность, сила вершины, центральность собственного вектора и степень посредничества; дополнительно выполнялся ROI–ROI анализ в 9 ROI (ЗРП) и 10 ROI (ПИ), выделенных по фМРТ мета-анализам. Для ПИ в покое и при когнитивной нагрузке оценивались глобальные метрики (SWI, модульность, CC/Normal CC, CPL). Для прогнозирования ПИ использовалась полносвязная нейросеть прямого распространения (PyTorch) для регрессии по векторизованным матрицам ЭЭГ-связности 68×68 из 4 состояний (покой/нагрузка × открытые/закрытые глаза) и 4 диапазонов; N=92 (train 73, test 19). Метрики качества  $R^2$ , MAE и  $\rho$  Спирмена; обучение 200 эпох, batch=64.

**Выборка:** 1) ЗРП и решение Равена: N=74 (13 м., 61 ж.), 18-27 лет (M=19,2±1,6). 2) ПИ в покое/нагрузке и машинное обучение: N=92 (48 м., 44 ж.), 18-35 лет (M=20,9).

**Результаты и обсуждение.** *Зрительная рабочая память (2-back).* На среднем уровне более высокая эффективность ЗРП связана со сниженной центральностью фронтальных узлов: центральность собственного вектора (альфа и 4–30 Гц:  $r=-0,45 \dots -0,34$  и  $r=-0,36 \dots -0,34$ ;  $p<0,05$ ), сила вершины (альфа:  $r=-0,42 \dots -0,39$ ;  $p<0,05$ ), локальная эффективность (альфа:  $r=-0,39 \dots -0,38$ ;  $p<0,05$ ) и степень посредничества (альфа:  $r=-0,41$ ;  $p<0,05$ ). Также снижена локальная эффективность левой верхней лобной извилины (4–30 Гц:  $r=-0,37$ ;  $p<0,05$ ). На локальном уровне эффективность ЗРП обратно связана с межполушарной фронтальной связностью (альфа  $r=-0,43$ ,  $p=0,02$ ; бета  $r=-0,40$ ,  $p=0,04$ ), что

соответствует профилю «экономной» сети с меньшей избыточной синхронизацией и перегрузкой хабов.

*Подвижный интеллект (корреляции).* В покое в тета-диапазоне ПИ отрицательно связан с SWI (открытые/закрытые глаза:  $r=-0,27$  и  $r=-0,21$ ;  $p<0,05$ ) и с модулярностью при открытых глазах ( $r=-0,24$ ;  $p<0,05$ ), а в бета-диапазоне при закрытых глазах SWI связан положительно ( $r=0,21$ ;  $p<0,05$ ), что указывает на частотно-зависимую оптимальность исходной конфигурации сети. При когнитивной нагрузке при открытых глазах ПИ положительно коррелирует с SWI в альфа-диапазоне ( $r=0,26$ ;  $p<0,05$ ). При решении матриц Равена продуктивность отрицательно связана с SWI и Normal CC на глобальном уровне ( $r=-0,43$ ;  $p=0,004$ ), со сниженной центральностью левой ростральной средней лобной извилины на среднем уровне ( $r=-0,33$ ,  $p=0,008$ ;  $r=-0,31$ ,  $p=0,019$ ) и с ослаблением фронтальной связи слева на локальном уровне (альфа  $r=-0,43$ ,  $p=0,006$ ; 4–30 Гц  $r=-0,42$ ,  $p=0,011$ ), что согласуется с гипотезой нейронной эффективности и гибкой деспециализации [1].

*Исследование подвижного интеллекта с помощью машинного обучения.* Модель на матрицах ЭЭГ-связности значимо предсказывает ПИ (Спирмен  $r=0,48$ ,  $p=0,039$ ; MAE=4,607;  $R^2=0,196$ ); наибольший вклад дают связи, интегрирующие височно-префронтальные, зрительно-теменные и медиальные (в т.ч. энторинальная кора) системы.

**Выводы.** ЗПП (2-back): более высокая эффективность связана со сниженной центральностью покрывочной части левой нижней лобной извилины, сниженной локальной эффективностью левой верхней лобной извилины и ослаблением межполушарной связности между правой и левой средней лобной извилиной (альфа/бета). ПИ (корреляции): в покое ПИ отрицательно связан с SWI (тета, открытые/закрытые глаза) и с модулярностью (тета, открытые глаза), но положительно — с SWI в бета-диапазоне при закрытых глазах; при когнитивной нагрузке (открытые глаза) ПИ положительно связан с SWI в альфа-диапазоне. При решении матриц Равена продуктивность связана со снижением SWI/Normal CC при высоких порогах, сниженной центральностью левой ростральной средней лобной извилины и ослаблением связи между левой верхней лобной извилиной и ростральной частью левой средней лобной извилины. *Машинное обучение:* модель по матрицам ЭЭГ-связности значимо предсказывает ПИ, подтверждая предсказательную ценность сетевой архитектуры.

**Выражаем признательность** за консультации по обработке данных Т.В. Адамовичу, А.В. Комаровой, А.Е. Манаенкову, М.Е. Михейкину, Т.А. Горшковой и Д.Г. Митюревой, за помощь в подготовке стимулов – Е.Т. Щербаковой, за помощь в сборе данных – Тарасовой Д.М., Скрипкиной С.М., Абросимовой В.Д., Бородкиной А.С., Верхолаз Д.М., Вовненко А.Е., Зубко В.М., Кабановой П.И., Каширину В.А., Коробковой А.А., Кривченковой Е.В., Обрящикову И.Е., Сафоновой М.И., Терличенко Е.О., Ударцевой В.К., Усаевой Е.М., Фридт Е.Д. и Цимбалюк Е.В.

### Источники и литература

- 1) Barbey A. Network Neuroscience Theory of Human Intelligence // Trends in Cognitive Sciences. 2018. 22, 8-20.
- 2) Raven J. C., Court J. H. Raven's Progressive Matrices and Vocabulary Scales. – Oxford: Oxford Psychologists Press, 2012. – 759 с.
- 3) Vinck M. и др. An improved index of phase-synchronization for electrophysiological data in the presence of volume-conduction, noise and sample-size bias // NeuroImage. – 2011. – Т. 55. – № 4. – С. 1548–1565.