

Перевод на английский язык <https://vavilov.elpub.ru/jour>

Апробация технологии оценки мимики лиц для изучения динамики функциональных состояний человека в ЭЭГ-парадигме покоя

А.Н. Савостьянов^{1, 2, 3}✉, Е.Г. Вергунов², А.Е. Сапрыгин^{1, 2}, Д.А. Лебедкин^{2, 3}

¹ Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

² Научно-исследовательский институт нейронаук и медицины, Новосибирск, Россия

³ Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Гуманитарный институт, Новосибирск, Россия

✉ a-sav@mail.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследования, направленного на поиск ковариат для учета деятельности имплицитных когнитивных процессов в условиях функционального покоя испытуемых и при демонстрации им собственного или чужого лица в совместном анализе данных ЭЭГ-эксперимента. Предлагаемый подход основан на анализе динамики мышц лица испытуемого по видео. В пилотном исследовании приняли участие 18 здоровых добровольцев. В эксперименте испытуемые, сидя перед экраном, последовательно закрывали глаза (три пробы по 2 минуты) и открывали их (также три пробы между периодами закрытых глаз) либо перед пустым экраном, либо перед экраном с демонстрацией видеозаписи их собственного лица или лица незнакомого им человека такого же пола, что и участник. У всех испытуемых регистрировали ЭЭГ, ЭКГ и вели запись видео лица. В работе решали отдельную подзадачу эксперимента: апробацию методики оценки динамики активности мышц лица испытуемых по их видео с открытыми глазами для получения ковариат, которые можно включать в последующую обработку совместно с ЭЭГ-коррелятами в нейрокогнитивных экспериментах с парадигмой, не предполагающей выполнение активных когнитивных заданий (resting-state conditions). Показано, что пол испытуемого, статус экрана (пустой, собственное/чужое лицо), номер пробы связаны с различиями в мимической активности лица и могут выступать искомыми ковариатами. Сделан вывод, что анализ динамики мимической активности по видео с открытыми глазами может быть дополнительным методом в нейрокогнитивных исследованиях для изучения имплицитных когнитивных процессов, связанных с восприятием изображения себя и другого, в парадигме функционального покоя.

Ключевые слова: нейрокогнитивные исследования; свое и чужое лицо; ЭЭГ-корреляты; ковариаты; имплицитные когнитивные процессы; самовосприятие.

Для цитирования: Савостьянов А.Н., Вергунов Е.Г., Сапрыгин А.Е., Лебедкин Д.А. Апробация технологии оценки мимики лиц для изучения динамики функциональных состояний человека в ЭЭГ-парадигме покоя. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2022;26(8):765-772. DOI 10.18699/VJGB-22-92

Validation of a face image assessment technology to study the dynamics of human functional states in the EEG resting-state paradigm

A.N. Savostyanov^{1, 2, 3}✉, E.G. Vergunov², A.E. Saprygin^{1, 2}, D.A. Lebedkin^{2, 3}

¹ Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

² Scientific Research Institute of Neurosciences and Medicine, Novosibirsk, Russia

³ Institute for the Humanities of Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

✉ a-sav@mail.ru

Abstract. The article presents the results of a study aimed at finding covariates to account for the activity of implicit cognitive processes in conditions of functional rest of the subjects and during them being presented their own or someone else's face in a joint analysis of EEG experiment data. The proposed approach is based on the analysis of the dynamics of the facial muscles of the subject recorded on video. The pilot study involved 18 healthy volunteers. In the experiment, the subjects were sitting in front of a computer screen and performed the following task: sequentially closed their eyes (three trials of 2 minutes each) and opened them (three trials of the same duration between periods of closed eyes) when the screen was either empty or when it was showing a video recording of their own face or the face of an unfamiliar person of the same gender as the participant. EEG, ECG and a video of the face were recorded for all subjects. In the work a separate subtask of the study was also addressed: validating a technique for assessing the dynamics of the subjects' facial muscle activity using the recorded videos of the "eyes open" trials to obtain covariates that can be included in subsequent processing along with EEG correlates in neurocognitive experiments with a paradigm that does not involve the performance of active cognitive tasks ("resting-state conditions"). It was shown that

the subject's gender, stimulus type (screen empty or showing own/other face), trial number are accompanied by differences in facial activity and can be used as study-specific covariates. It was concluded that the analysis of the dynamics of facial activity based on video recording of "eyes open" trials can be used as an additional method in neurocognitive research to study implicit cognitive processes associated with the perception of oneself and other, in the functional rest paradigm.

Key words: neurocognitive studies; own and other face; EEG correlates; covariates; implicit cognitive processes; self-perception.

For citation: Savostyanov A.N., Vergunov E.G., Saprygin A.E., Lebedkin D.A. Validation of a face image assessment technology to study the dynamics of human functional states in the EEG resting-state paradigm. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Selekcii* = *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2022;26(8):765-772. DOI 10.18699/VJGB-22-92

Введение

Технологии нейрокогнитивных исследований чаще всего основываются на использовании различных подходов к регистрации мозговой активности участников обследований при помощи таких методик, как ЭЭГ или фМРТ (Bringas-Vega et al., 2022). В последние два десятилетия (Biswal, 2012; Snyder, Raichle, 2012) большой интерес у исследователей вызывают функциональные состояния мозга, наблюдаемые в условиях отсутствия внешней когнитивной или эмоциональной нагрузки, т. е. в экспериментальной парадигме покоя (resting-state conditions).

В серии исследований было показано, что функциональные состояния мозга в условиях покоя отражают индивидуальные особенности испытуемых, включая их пол (Volf et al., 2015), возраст (Privodnova et al., 2020; Engemann et al., 2022), генетические особенности (Proshina et al., 2018), социокультурную принадлежность (Knyazev et al., 2012), климатогеографические условия проживания (Milakhina et al., 2020), психологические личностные особенности (Kabbara et al., 2020) и предрасположенность к аффективным нарушениям (Greicius et al., 2007). Однако проблемой использования техник нейрокартирования остается большая вариативность фоновых показателей мозговой активности у здоровых испытуемых (Li et al., 2022). Можно привести пример сравнительного исследования M. Li с коллегами, выполненного на выборке из более чем 1500 участников в девяти странах, в котором выявлено, что показатели фоновой ЭЭГ здорового человека значительно различаются в зависимости как от свойств испытуемых, так и от условий регистрации, которые не входят в экспериментальную парадигму (Li et al., 2022). При этом формально одинаковые условия записи (закрытые глаза без внешней нагрузки) могут давать разные результаты в зависимости от того, в каком регионе мира и в какой период года проводилась регистрация ЭЭГ.

Один из факторов, существенно меняющий функциональные состояния мозга в условиях покоя, – наличие или отсутствие размышлений человека о самом себе в период регистрации у него мозговой активности. В работе (Knyazev et al., 2012) показано, что размышления о самом себе индуцируют повышенную активность дефолт-системы мозга. При этом функциональная организация дефолт-системы в этих условиях продемонстрировала достоверные межкультурные различия при сравнении испытуемых из Новосибирска и Тайваня.

В случае с фМРТ дополнительным фактором является реагирование человека на саму ситуацию помещения его в сканер. Запись фМРТ проводится, когда человек лежит в тесном боксе в условиях звукового шума и ограничен-

ной подвижности, иногда требуется введение контраста. Очевидно, что часть людей реагирует на такие условия как на стрессор, тогда как другие люди воспринимают эти условия иначе, что обуславливает сильный разброс оценок функционального состояния испытуемых. Отсюда возникает задача: на основе дополнительных методов найти такие корреляты (или ковариаты), которые при последующем анализе совместно с результатами ЭЭГ- или фМРТ-обследований позволят более полно учесть психофизиологическое состояние испытуемого.

В случае экспериментальной парадигмы с использованием стимулов для индицирования требуемого состояния участников оценка такого состояния происходит в процессе анализа поведенческих показателей (например, таких как точность/скорость реагирования на внешние стимулы), но при исследовании состояния покоя это невозможно.

Другой метод состоит в применении психологических опросников, которые испытуемому предлагается заполнить до или после обследования. Показатели опросников используются как переменные для оценки субъективных состояний человека в условиях эксперимента или его личностных свойств. Однако такой метод ограничен искренностью испытуемого при заполнении опросника и его способностью к адекватной самооценке, что может быть особенно выражено в случае нейропсихиатрических заболеваний.

В нашем пилотном исследовании предлагается подход с использованием ковариат, которые можно получить из динамики активности мышц лица по видео и которые связаны с психофизиологическим состоянием участников ЭЭГ-эксперимента. Анализ активности мышц лица в психофизиологии апробирован (Николаева, Вергунов, 2021), но не использовался для совместного анализа с ЭЭГ-данными.

Мы проверяем гипотезу о том, что динамика активности мимики лица и продолжительность фиксации взгляда испытуемых на экране в пробах при фоновой активности с отсутствием явных экспериментальных заданий различаются в зависимости от таких факторов, как пол испытуемого, демонстрация пустого экрана или экрана с видео его собственного лица или лица другого человека этого же пола, порядок следования пробы.

У испытуемых были проведены комплексное психологическое тестирование для оценки их личностных черт и регистрация ЭЭГ и ЭКГ совместно с записью видео лиц. Однако в рамках данной публикации мы не приводим результаты ЭЭГ, ЭКГ и психометрии, оставляя их для анализа совместно с выявленными ковариатами на последующих этапах эксперимента.

Материалы и методы

Описание выборки. В экспериментах участвовало 18 добровольцев (8 мужчин и 10 женщин, средний возраст 19.5 ± 1.3 года) из числа студентов Новосибирского государственного университета. Перед проведением обследования все участники подписали информированное согласие. Кроме того, все испытуемые заполнили опросник на наличие у них психиатрических или неврологических заболеваний, анкету на самочувствие перед обследованием и на употребление алкоголя или психоактивных веществ. Критериями исключения были:

- наличие установленных медицинских диагнозов;
- употребление наркотиков или психотропных медицинских препаратов;
- состояние алкогольного опьянения или сильного психологического стресса;
- нарушение инструкций при обследовании (прикрытие части лица рукой, резкие движения, изменение позы так, что часть лица выходит из поля видимости камеры и т. д.).

Процедура обследования. Во время эксперимента испытуемые сидели в кресле в звукоизолированной камере с приглушенным освещением. На голове участника находился ЭЭГ-шлем, на левой руке и обеих ногах прикреплены электроды для регистрации ЭКГ. Испытуемые были оповещены, что в процессе регистрации ЭЭГ и ЭКГ проводится видеосъемка их лица. Протокол эксперимента был утвержден этическим комитетом НИИ нейронаук и медицины в соответствии с этическими нормами Хельсинкской декларации по проведению биомедицинских исследований.

Участники получали инструкцию минимизировать движения руками, ногами и головой. Они должны были по команде, подаваемой компьютером, открывать или закрывать глаза. От них не требовалось специально сосредотачивать свой взгляд на экране, но и не запрещалось это делать. У каждого участника обследование проводилось в трех различных условиях:

- а) фоновая запись с попеременным закрыванием/открыванием глаз (по 3 пробы каждого типа по 2 минуты), при которой на экране компьютера не было никаких изображений;
- б) запись с открыванием и закрыванием глаз, при которой на экране демонстрировалась видеозапись с изображением лица участника, сделанная ранее в условиях (а) (также по 3 пробы каждого типа по 2 минуты);
- в) запись с открыванием и закрыванием глаз, при которой участнику демонстрировали видеозапись лица незнакомого ему человека того же пола, что и сам участник (также по 3 пробы каждого типа по 2 минуты).

Все участники обследовались во всех трех условиях. Первым условием всегда было условие (а), т. е. запись без дополнительной внешней стимуляции, для половины участников вторым условием было (б) (свое лицо), третьим – (в) (чужое лицо), а для другой половины участников наоборот – вторым было условие (в), а третьим – (б).

В интервалах между фоновыми экспериментами участники выполняли активные экспериментальные задания – решение лингвистических тестов на поиск синтаксических ошибок в предложениях между первым и вторым

фоновым обследованием (примерно 25 мин) и выполнение моторных тестов в парадигме стоп-сигнал (примерно 12 мин) между вторым и третьим фоновым обследованием.

Перед первым экспериментальным условием все участники заполняли русскую версию опросника Ч. Спилбергера для оценки уровня ситуативной тревожности (Ханин, 1976). После завершения первого условия опросник Ч. Спилбергера заполнялся повторно, чтобы оценить, влияет ли участие в обследовании на уровень ситуативной тревожности. Кроме того, после завершения каждого из экспериментальных условий участники заполняли опросник Г.Г. Князева на самочувствие во время записи ЭЭГ (Knyazev et al., 2012). Таким образом, каждый участник заполнял опросник Ч. Спилбергера по два раза (до и после первого экспериментального условия), а опросник Г.Г. Князева – три раза (после каждого экспериментального условия).

Предлагаемый нами дизайн исследования позволяет контролировать факторы, которые могут сопутствовать имплицитным когнитивным процессам при предъявлении лиц (собственного и чужого) или пустого экрана:

- особенности активности двигательных единиц для мышц лица (AU) согласно facial action coding system (FACS);
- особенности распределения времени в пробе относительно фиксации взгляда испытуемых на экране;
- особенности восприятия испытуемыми разного пола;
- особенности восприятия первой и последующих проб;
- индивидуальная специфика имплицитных когнитивных процессов, связанная с личностными чертами испытуемых, такими как уровень тревожности.

Отметим, что анализ последнего фактора (индивидуальная специфика) не входит в задачи настоящего исследования. Позже совместный анализ результатов психологических опросников с результатами кластеризации по данному фактору будет использован для психофизиологического профилирования испытуемых.

Методика оценки экспрессии лицевых мышц. Для оценки экспрессии мышц лица испытуемого по видео широко разрабатываются соответствующие программные инструменты, в том числе общего доступа. В работе был использован фреймворк OpenFace – открытое решение, которое позволяет отслеживать лицо человека по фотографии, по последовательности изображений или по видеопотоку (Сапрыгин et al., 2022). На обычную видеокамеру для компьютера записывали поток видео при выполнении испытуемым задач, затем на основе регрессионной модели выделяли лицевые двигательные единицы (AU) по системе FACS (facial action coding system) и анализировали динамику их активности в период проб с открытыми глазами (рис. 1). Опытным путем было выявлено, что динамике AU в течение периода порядка 2 минут неподвижного сидения испытуемого лучше всего характеризует не значение средней величины или стандартного отклонения (большое количество небольших случайных изменений создает «шум»), а размах значений. Поэтому в анализ был взят именно размах значений экспрессии для каждой AU.

Фреймворк OpenFace основан на использовании подхода CLM (constrained local model). Разрабатываемое ав-

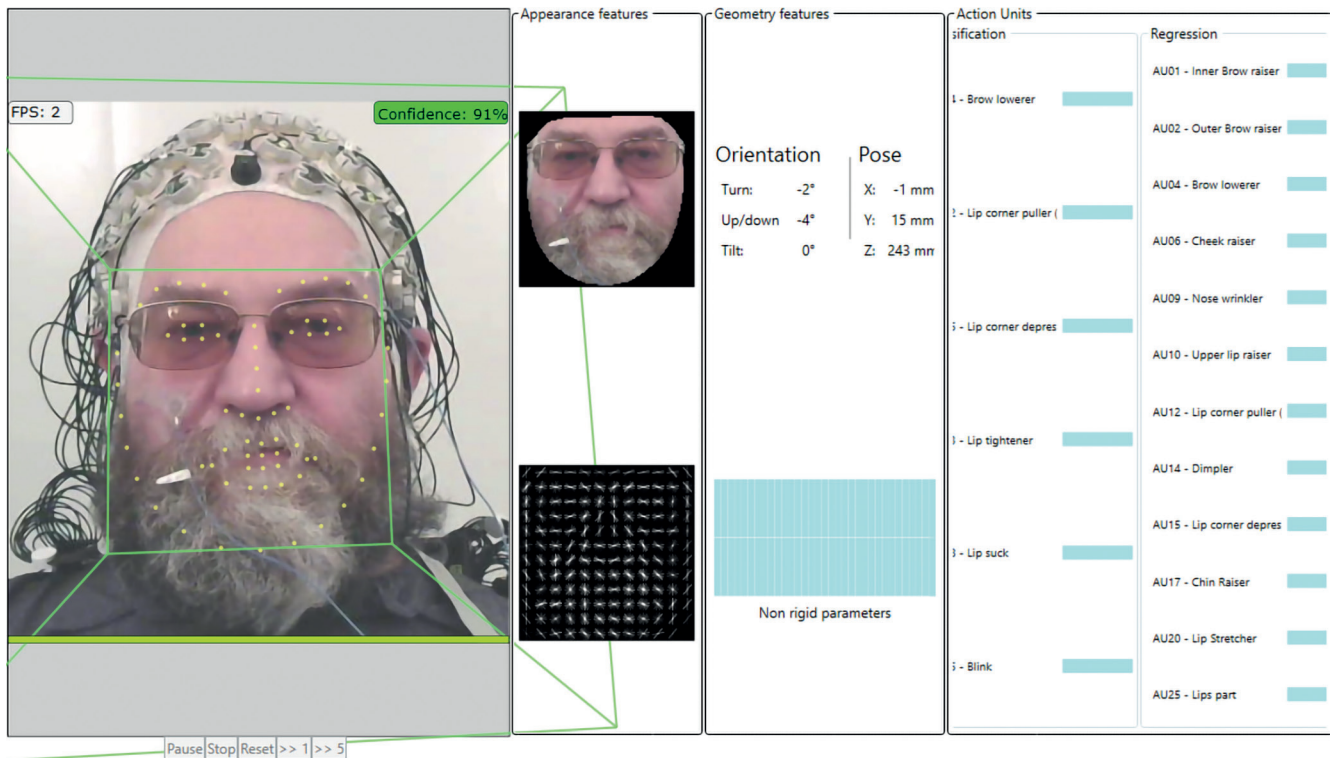


Рис. 1. Копия экрана программы с обработкой мимики лица участника обследования из видео с элементами усложнения для анализа (темные очки, борода, усы, шапочка с электродами для регистрации ЭЭГ).

FPS – скорость обработки, число кадров в секунду; confidence – уровень надежности (зеленый цвет говорит о приемлемом уровне); appearance features – распознанные программой особенности мимики после приведения лица в вертикальное положение; geometry features – геометрия 3D-положения и ориентации лица; action units – активность двигательных единиц для мышц лица (AU согласно FACS); classification – значения AU, полученные методом классификации (в настоящем исследовании не используется); regression – значения AU, полученные методом регрессии (см. таблицу); orientation – угловые 3D-показатели ориентации лица; turn – поворот лица (влево+, вправо-); up/down – наклон лица (вверх+, вниз-); tilt – наклон лица к плечу (левому+, правому-); pose – линейные показатели положения лица; X, Y, Z – координаты центра лица (в мм); non rigid parameters – нежесткие параметры; pause, stop, reset, >>1, >>5 – кнопки управления проигрывателем кадров/видео.

торами пилотное программное обеспечение на основе OpenFace_GUI позволяет визуализировать в реальном времени набор возможностей, которые предоставляют 3D-модели фреймворка OpenFace (координаты ключевых точек лица, положение и углы наклона головы в пространстве, направление взгляда). Фреймворк OpenFace состоит из трех основных частей: 1) программного C++ кода, реализующего основной аналитический поток; 2) файлов предтренированных моделей для детекции лица, детекции и отслеживания ключевых точек лица, вычисления двигательных единиц; 3) Matlab-кода для создания собственных файлов моделей.

Файлы моделей создаются с помощью широкого спектра обучающих наборов данных (датасетов). Программный код фреймворка OpenFace является открытым и доступен по лицензии GNU: <https://github.com/TadasBaltrusaitis/OpenFace>.

Математические основы модели. PLS-анализ – это метод получения проекций на латентные структуры (projection to latent structure), первоначальное название которого – «метод частичных наименьших квадратов» (partial least squares). Эффективные инструменты PLS-анализа – бикомпонентные модели (2B-PLS, two-block PLS) (Rohlf, Corti, 2000). Бикомпонентные модели для изучения имплицитных когнитивных процессов выявляют глубинные независимые (ортогональные) «латентные структуры»

(психофизиологические механизмы) одновременно для двух разных блоков (матрицы B1 и B2) многомерных показателей (Kovaleva et al., 2019).

При построении бикомпонентных моделей происходят центрирование рядов данных, масштабирование и повороты обоих блоков для получения максимальной ковариации между матрицами счетов (B1- и B2-score), которые являются проекциями матриц B1 и B2 на искомые латентные структуры. В этом заключается главное отличие 2B-PLS от PCA (principal component analysis, метод главных компонент), который позволяет строить модели только «однокомпонентного» типа. Например, в один блок можно поместить переменные-признаки (состоят только из «0» и «1», дисперсия минимальная), а в другой – ряды инструментальных данных (дисперсия много больше, чем у признаков).

Полученные в бикомпонентной модели латентные структуры описываются с помощью ортогональных матриц нагрузок (B1- и B2-loadings). Строки в матрицах B1 и B2 – это данные по объектам, столбцы – изучаемые показатели. Таким образом, показатели выступают как исходные оси координат (в том числе и коррелированные между собой) и могут рассматриваться как «явные структуры», каждая из которых обуславливает некоторое (обычно небольшое) количество общей дисперсии. Цель бикомпонентной модели состоит в нахождении системы

Блоки переменных для бикомпонентной модели

Переменная	Блок
AU01 – лобная мышца, подниматель медиального края брови	№ 1
AU02 – лобная мышца, подниматель латерального края брови	№ 1
AU04 – мышца гордецов, опускающий брови	№ 1
AU06 – глазничная часть круговой мышцы глаза, подниматель щеки	№ 1
AU09 – подниматель верхней губы и крыла носа, сморщиватель носа	№ 1
AU10 – нижнеглазничная головка квадратной мышцы верхней губы, подниматель верхней губы	№ 1
AU12 – большая скуловая мышца, подниматель уголка губы	№ 1
AU14 – мышца трубачей, щёчная мышца, ямочка на щеке	№ 1
AU15 – треугольная мышца рта, опускающий угол рта	№ 1
AU17 – подбородочная мышца, подниматель подбородка	№ 1
AU20 – мышца смеха, растягиватель губ	№ 1
AU25 – совокупность расслабления подбородочной мышцы и круговой мышцы рта, губы разведены	№ 1
t – доля времени (от продолжительности предъявления) фиксации взгляда на экране испытуемым при предъявлениях стимулов	№ 1
n1–n3 – признак номера предъявления стимула	№ 2
f – признак принадлежности к женскому полу	№ 2
m – признак принадлежности к мужскому полу	№ 2
fn – признак стимула (экран без лица)	№ 2
tf – признак стимула (экран с чужим лицом такого же пола)	№ 2
wf – признак стимула (экран со своим лицом)	№ 2
s6–s49 – признаки индивидуальной специфики (коды испытуемых)	№ 2

Примечание. Классификация AU соответствует Facial Action Coding System (FACS).

пар осей для обоих блоков сразу, которые выражают максимальный шаблон ковариации (Polunin et al., 2019). При этом матрицы нагрузок – это матрицы перехода от исходных «явных структур» к найденным новым «латентным структурам».

В результате применения бикомпонентной модели мы получаем количество латентных структур (новых осей координат), которое равно минимальному числу переменных из двух блоков исходных данных. Заметим, что соотношения для структур сырых данных в блоках остаются теми же самыми после любого количества (и порядка применения) таких операций, как центрирование, масштабирование, поворот, которые применяются в PLS-или PCA-моделях. Таким образом, полностью сохраняется структура сырых данных, в то время как инструменты метода наименьших квадратов (ordinary least squares, OLS) в ряде случаев могут приводить к деформации исходной структуры.

В итоге построения бикомпонентной PLS-модели собирается вся информация из исходных рядов данных (количество которых может достигать многих сотен) в несколько первых независимых латентных структур. Модель 2B-PLS допускает ситуацию, когда число переменных больше (и даже много больше), чем число объектов, а также взаимную коррелированность исходных данных. Более того, ряды данных могут представлять собой линейные комбинации друг друга (Ränner et al., 1994).

Результаты и обсуждение

Построена модель 2B-PLS, в блоки которой вошли переменные, представляющие собой ряды инструментальных данных (13 переменных, блок № 1) и ряды признаков (26 переменных, блок № 2) (см. таблицу). Соответственно, получено 13 латентных структур.

Как следует из рисунка «осыпи» для латентных структур построенной модели 2B-PLS (рис. 2), первый перегиб графика приходится на структуру № 2. Таким образом, структура № 1 (до первого перегиба) будет отражать общие особенности имплицитных когнитивных процессов (обусловленная ею доля наблюдаемой общей дисперсии это подтверждает).

Второй перегиб графика приходится на структуру № 4. Таким образом, для структур № 2 и 3 определяющей будет являться частная специфика имплицитных когнитивных процессов. В последующих структурах растет шумовая компонента – одновременно со снижением доли описываемой общей дисперсии, однако мы еще рассмотрим структуру № 4 – она обуславливает более 5 % общей дисперсии.

Позже анализ результатов психологических опросников совместно с итогами кластеризации по полученным нами структурам может быть использован для целей психофизиологического профилирования испытуемых. Отсюда следует вывод, что для последующей обработки индивидуальных данных испытуемых в ЭЭГ-эксперименте необ-

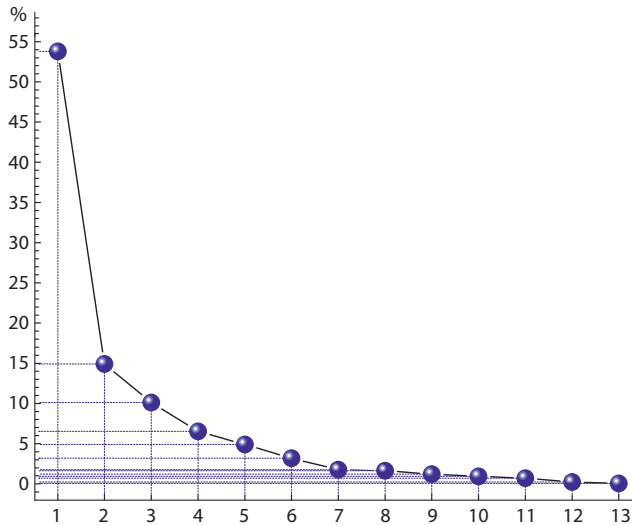


Рис. 2. График осипи для латентных структур построенной модели 2B-PLS.

Ось X – номера латентных структур; ось Y – описываемая ими доля наблюдаемой общей дисперсии.

ходимо оценивать влияние различий в их имплицитных когнитивных процессах, возникающих при появлении на экране своего или чужого лица.

Первые четыре латентные структуры описывают 85.4 % общей дисперсии, и определяющими признаками являются пол, тип стимула и порядок проб.

Согласно рис. 3, первая структура описывает 53.8 % общей дисперсии и определяется долей времени фиксации взгляда испытуемого на экране, активностью «мышцы трубочей» и «мышцы смеха», признаками пола и восприятием всех первых проб. Таким образом, восприятие всех первых проб сопровождается ростом активности мышц «трубоча» и «смеха» и снижением доли времени фиксации взгляда на экране у девушек, а у юношей – наоборот, снижением активности этих мышц и увеличением времени фиксации взгляда на экране.

Вторая структура описывает 14.9 % общей дисперсии и определяется долей времени фиксации взгляда испытуемого на экране, активностью поднимателя щеки и признаками типа стимулов (см. рис. 3). На основании этого можно заключить, что восприятие всеми испытуемыми собственного лица на экране сопровождается ростом активности поднимателя щеки и ростом доли времени фиксации взгляда на экране, а восприятие пустого экрана – наоборот, снижением активности поднимателя щеки и уменьшением времени фиксации взгляда.

Можно отметить, что в пространстве первых двух латентных структур восприятие чужого лица у всех испытуемых сопровождается ростом активности поднимателей верхней губы и подбородка и опускателя угла рта.

Согласно рис. 4, третья структура описывает 10.1 % общей дисперсии и определяется активностью сморщивателя носа, поднимателя подбородка и признаками пола и первой пробы. Отсюда следует вывод, что восприятие всех первых проб сопровождается ростом активности сморщивателя носа и снижением активности поднимателя подбородка у девушек, а у юношей – наоборот, снижением

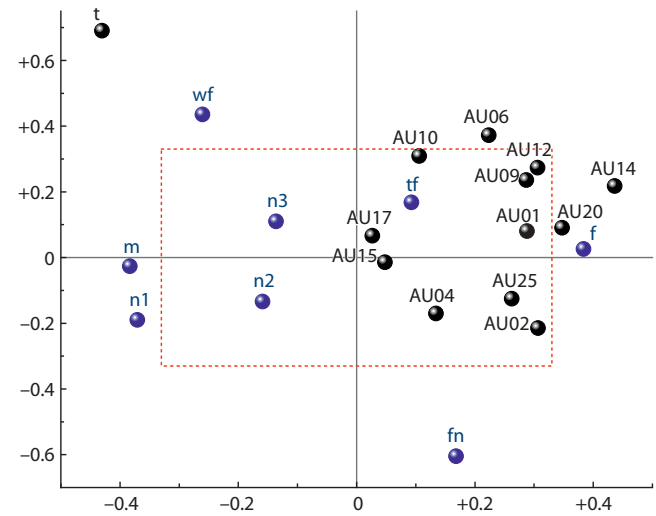


Рис. 3. Нагрузки (коэффициенты корреляции) переменных для латентной структуры 1 (ось X; 53.8 % общей дисперсии) и структуры 2 (ось Y; 14.9 % общей дисперсии) в модели 2B-PLS.

Здесь и на рис. 4: черный цвет – инструментальные переменные, синий – переменные-признаки (см. таблицы); внутри прямоугольника (красный пунктир) – статистическая достоверность коэффициентов корреляции $p > 0.05$; признаки индивидуальной специфики для улучшения читаемости графика скрыты.

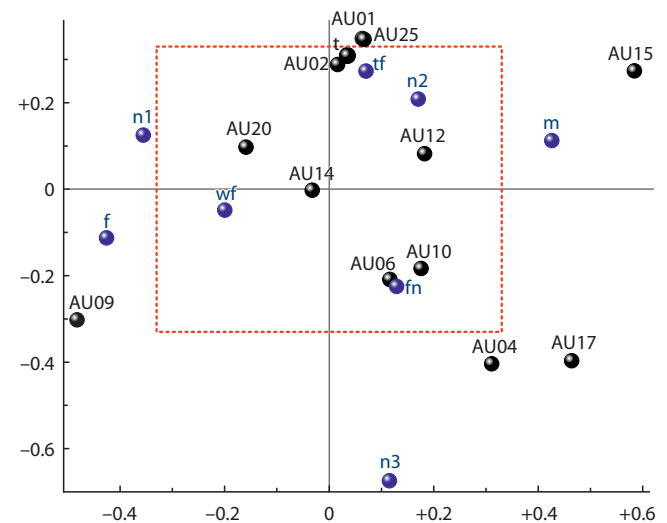


Рис. 4. Нагрузки (коэффициенты корреляции) переменных для латентной структуры 3 (ось X; 10.1 % общей дисперсии) и структуры 4 (ось Y; 6.6 % общей дисперсии) в модели 2B-PLS.

активности сморщивателя носа и ростом активности поднимателя подбородка.

Четвертая структура описывает 6.6 % общей дисперсии и определяется признаком последних проб, активностью поднимателя медиального края брови, мышцы гордецов, поднимателя подбородка и разведением губ (см. рис. 4). Из чего можно заключить, что реакция на все третьи пробы у всех испытуемых сопровождается ростом активности поднимателя подбородка и мышцы гордецов, снижением активности поднимателя медиального края брови и степени расслабления подбородочной мышцы и круговой мышцы рта, а также меньшим разведением губ.

Можно отметить, что в пространстве латентных структур № 3 и 4 восприятие чужого лица у всех испытуемых сопровождается ростом доли времени фиксации взгляда на экране и ростом активности поднимателей медиального и латерального края брови, расслаблением подбородочной мышцы и круговой мышцы рта, разведением губ.

Таким образом, в ЭЭГ/ЭКГ-эксперименте в совместную обработку рекомендуется включать (кроме влияния индивидуальных различий имплицитных когнитивных процессов) следующие переменные-ковариаты: пол, порядок следования проб, наличие своего лица на экране/пустой экран.

Заключение

Электроэнцефалограмма является одним из наиболее распространенных методов для неинвазивного исследования функционального состояния головного мозга человека в норме и при патологиях. При анализе взаимосвязи между показателями ЭЭГ и поведенческой активностью испытуемого в качестве поведенческих метрик обычно выбирают двигательные (существенно реже речевые) ответы испытуемых. Этот выбор обусловлен в первую очередь тем, что такие ответы просто отмечать на записях ЭЭГ. Мы предположили, что изменения в состоянии лицевой мимической мускулатуры могут служить поведенческим фенотипическим признаком, ассоциированным одновременно с личностными особенностями участника обследования, включая его предрасположенность к психическим заболеваниям, и эндофенотипическими параметрами мозговых ритмов.

В данной статье мы предлагаем методологическую идею по регистрации и обработке лицевого видео совместно с регистрацией ЭЭГ. Проведено пилотное исследование по поиску ковариат, статистически связанных с лицевой экспрессией, для их учета в анализе ЭЭГ, регистрируемой в парадигме функционального покоя, а также при демонстрации испытуемым видеоизображения собственного или чужого лица. Этот подход основан на анализе динамики мышц лица испытуемого по видео, которое записывается одновременно с регистрацией ЭЭГ и ЭКГ.

Показано, что динамика активности лицевой мускулатуры отражает контролируемые условия, которые обычно не используются в анализе ЭЭГ-коррелят когнитивных процессов, но, как следует из результатов, могут сопутствовать тем или иным имплицитным когнитивным процессам. Учет таких ковариат, как пол испытуемого, статус экрана (пустой, собственное/чужое лицо) и номер пробы, повысит надежность оценки когнитивного состояния испытуемых и предоставит дополнительную информацию для интерпретации ЭЭГ/ЭКГ-результатов. Кластеризация испытуемых по факторам индивидуальной специфики имплицитных когнитивных процессов составит основу для их эффективного профилирования.

В настоящей работе мы не проводили анализ данных ЭЭГ/ЭКГ и психометрии, поскольку это пилотное исследование с ограниченными задачами. В дальнейшем планируется увеличить размер экспериментальной выборки и провести более детальное сопоставление результатов

анализа активности лицевой мускулатуры с результатами других нейрокогнитивных методик. Для этих перспективных задач мы отработали методику получения данных для профилирования испытуемых по описанным авторами латентным структурам, что позволяет результаты сформированной модели использовать в качестве дополнительных переменных для сводных моделей второго уровня (в том числе результаты ЭЭГ, ЭКГ и др.).

Список литературы / References

- Николаева Е.И., Вергунов Е.Г. Оценка связи асимметрии лицевой экспрессии с тормозным контролем и латеральными предпочтениями у физически активных мужчин. *Асимметрия*. 2021; 15(4):38-53. DOI 10.25692/ASY.2021.15.4.004.
- [Nikolaeva E.I., Vergunov E.G. Evaluation of the relationship of facial expression asymmetry with inhibitory control and lateral preferences in physically active men. *Asimetriya = Asymmetry*. 2021; 15(4):38-53. DOI 10.25692/ASY.2021.15.4.004. (in Russian)]
- Ханин Ю.Л. Краткое руководство к шкале реактивной и личностной тревожности Ч.Д. Спилбергера. Л.: ЛНИИФК, 1976.
- [Khanin Yu.L. Quick Guide to C.D. Spielberger's Scale of State and Trait Anxiety. Leningrad, 1976. (in Russian)]
- Biswal B.B. Resting state fMRI: a personal history. *Neuroimage*. 2012; 62(2):938-944. DOI 10.1016/j.neuroimage.2012.01.090.
- Bringas-Vega M.L., Michel C.M., Saxena S., White T., Valdes-Sosa P.A. Neuroimaging and global health. *Neuroimage*. 2022;260:119458. DOI 10.1016/j.neuroimage.2022.119458.
- Engemann D.A., Mellot A., Hochenberger R., Banville H., Sabbagh D., Gemein L., Ball T., Gramfort A. A reusable benchmark of brain-age prediction from M/EEG resting-state signals. *Neuroimage*. 2022; 262:119521. DOI 10.1016/j.neuroimage.2022.119521.
- Greicius M.D., Flores B.H., Menon V., Glover G.H., Solvason H.B., Kenna H., Reiss A.L., Schlaggar A.F. Resting-state functional connectivity in major depression: abnormally increased contributions from subgenual cingulate cortex and thalamus. *Biol. Psychiatry*. 2007;62(5):429-437. DOI 10.1016/j.biopsych.2006.09.020.
- Kabbara A., Paban V., Weill A., Modolo Ju., Hassan M. Brain network dynamics correlate with personality traits. *Brain Connect*. 2020; 10(3):108-120. DOI 10.1089/brain.2019.0723.
- Knyazev G.G., Savostyanov A.N., Volf N.V., Liou M., Bocharov A.V. EEG correlates of spontaneous self-referential thoughts: a cross-cultural study. *Int. J. Psychophysiol*. 2012;86(2):173-181. DOI 10.1016/j.ijpsycho.2012.09.002.
- Kovaleva V.Yu., Pozdnyakov A.A., Litvinov Yu.N., Efimov V.M. Estimation of the congruence between morphogenetic and molecular-genetic modules of gray voles *Microtus s.l.* variability along a climatic gradient. *Ecol. Genet*. 2019;17(2):21-34. DOI 10.17816/ecogen17221-34.
- Li M., Wang Y., Lopez-Naranjo C., Hu S., Reyes R.C.G., Paz-Linares D., Areces-Gonzalez A., Hamid A.I.A., Evans A.C., Savostyanov A.N., Calzada-Reyes A., Villringer A., Tobon-Quintero C.A., Garcia-Agustin D., Yao D., Dong L., Aubert-Vazquez E., Reza F., Razzaq F.A., Omar H., Abdullah J.M., Galler J.R., Ochoa-Gomez J.F., Prichep L.S., Galan-Garcia L., Morales-Chacon L., Valdes-Sosa M.J., Tröndle M., Zulkify M.F.M., Rahman M.R.B.A., Milakhina N.S., Langer N., Rudych P., Koenig T., Virues-Alba T.A., Lei X., Bringas-Vega M.L., Bosch-Bayard J.F., Valdes-Sosa P.A. Harmonized-Multinational qEEG norms (HarMNqEEG). *Neuroimage*. 2022;256:119190. DOI 10.1016/j.neuroimage.2022.119190.
- Milakhina N.S., Tamozhnikov S.S., Proshina E.A., Karpova A.G., Savostyanov A.N., Afonasiyeva E.B. Delta and gamma activity of resting-state EEG as one of the markers of risk of depressive disorders in migrants of subpolar and polar regions of Siberia. In: 2020 Cognitive Sciences, Genomics and Bioinformatics (CSGB). Novosibirsk, 2020;90-92. DOI 10.1109/CSGB51356.2020.9214596.

- Polunin D., Shtaiger I., Efimov V. JACOBI4 software for multivariate analysis of biological data. *bioRxiv*. 2019;803684. DOI 10.1101/803684.
- Privodnova E.Yu., Slobodskaya H.R., Bocharov A.V., Saprygin A.E., Knyazev G.G. Default mode network connections supporting intra-individual variability in typically developing primary school children: An EEG study. *Neuropsychology*. 2020;34(7):811-823. DOI 10.1037/neu0000699.
- Proshina E.A., Savostyanov A.N., Bocharov A.V., Knyazev G.G. Effect of 5-HTTLPR on current source density, connectivity, and topological properties of resting state EEG networks. *Brain Res*. 2018; 1697:67-75. DOI 10.1016/j.brainres.2018.06.018.
- Ränner S., Lindgren F., Geladi P., Wold S. A PLS kernel algorithm for data sets with many variables and fewer objects. Part 1: Theory and algorithm. *J. Chemometrics*. 1994;8(2):111-125. DOI 10.1002/cem.1180080204.
- Rohlf F.J., Corti M. Use of two-block partial least-squares to study covariation in shape. *Syst. Biol.* 2000;49(4):740-753. DOI 10.1080/106351500750049806.
- Saprygin A., Lebedkin D., Savostyanov A., Vergounov E. Behavioral and neurophysiological study of subject's personality traits under recognition of sentences about self and others. In: *Bioinformatics of Genome Regulation and Structure/Systems Biology (BGRS/SB-2022)*. Abstracts the Thirteenth International Multiconference, Novosibirsk, 04–08 July 2022. Novosibirsk, 2022;950. DOI 10.18699/SBB-2022-556.
- Snyder A.Z., Raichle M.E. A brief history of the resting state: the Washington University perspective. *Neuroimage*. 2012;62(2):902-910. DOI 10.1016/j.neuroimage.2012.01.044.
- Volf N.V., Belousova L.V., Knyazev G.G., Kulikov A.V. Gender differences in association between serotonin transporter gene polymorphism and resting-state EEG activity. *Neuroscience*. 2015;284:513-521. DOI 10.1016/j.neuroscience.2014.10.030.

ORCID ID

A.N. Savostyanov orcid.org/0000-0002-3514-2901
E.G. Vergunov orcid.org/0000-0002-8352-5368
A.E. Saprygin orcid.org/0000-0001-6789-2953
D.A. Lebedkin orcid.org/0000-0002-4356-9067

Благодарности. Сбор и обработка данных выполнены при поддержке Российского научного фонда, грант № 22-15-00142 «фМРТ и ЭЭГ корреляты фокуса внимания на собственной персоне как фактора предрасположенности к аффективным расстройствам». Работа А.Н. Савостьянова и А.Е. Сапрыгина по предпроцессингу данных финансировалась из средств бюджетного проекта ИЦиГ СО РАН № FWNR-2022-0020 «Системная биология и биоинформатика: реконструкция, анализ и моделирование структурно-функциональной организации и эволюции генов сетей человека, животных, растений и микроорганизмов».

Авторы благодарят В.Э. Каликина за программную реализацию инструмента для анализа AU по изображению лица на основе фреймворка OpenFace.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 13.09.2022. После доработки 17.11.2022. Принята к публикации 17.11.2022.