Российский психологический журнал, 2022, ТОМ 19, № 2, 201-219. **doi:** 10.21702/rpj.2022.2.15

Научная статья

УДК 159.91

https://doi.org/10.21702/rpj.2022.2.15

Альфа- и тета- ритмы как маркеры когнитивного усилия

Наталия А. Жожикашвили[1]✉, Анна Д. Бакумова[2], Ирина А. Бочковская[3]
[1] Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
[2] Психологический институт Российской академии образования
[3] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

✉nzhozhik@gmail.com

Аннотация: **Введение**. Данная обзорная статья объединяет теорию мотивационной интенсивности и теории ментального усилия с исследованиями осцилляторных коррелятов выполнения сложных когнитивных задач. Феномен усилия является давним предметом исследований в области фундаментальной психологии. Теории, описывающие когнитивные механизмы ментального усилия, получили развитие в последние годы. Однако дальнейшие исследования необходимы для объяснения механизма модуляции усилия при выполнении задач. **Теоретическое обоснование**. Ментальное усилие можно определить как активный волевой процесс мобилизации ресурсов для поддержания определенного поведения. Теория мотивационной интенсивности в совокупности с теориями ментального усилия описывают когнитивные и мотивационные факторы модуляции усилия, вкладываемого в выполнение задачи. Интерпретация осцилляторных коррелятов отдельных когнитивных процессов в контексте теорий усилия может позволить развить понимание механизма, лежащего в основе распределения и модуляции ментального усилия. Цель данной статьи заключается в обзоре существующих экспериментальных данных о модуляции связанных с задачей осцилляций и сравнении результатов исследований с предсказаниями теорий усилия. **Результаты**. В статье обозреваются исследования мощностей осцилляций как коррелятов различных контролируемых процессов, требуемых когнитивной задачей. Выраженность связанных с выполнением задачи осцилляторных эффектов увеличивается при усложнении задачи и при повышенной мотивации к выполнению. При выполнении особо сложных задач наблюдаются индивидуальные различия в показателях активности мозга, которые, по всей видимости, могут объясняться только через мотивационно-эмоциональную реакцию испытуемого на сложность. **Обсуждение результатов**. Обнаруженные в результате обзора литературы эффекты согласуются с предсказаниями теории мотивационной интенсивности о модуляции усилия. Однако на сегодняшний день наблюдается недостаток исследований, позволяющих соотнести осцилляторные данные с теориями усилия и развить понимание механизма модуляции усилия при различных требованиях задачи. В статье обсуждаются возможные исследования по данной теме и особенности необходимых экспериментальных дизайнов.

Ключевые слова: ментальное усилие, мотивационная интенсивность, мозговые осцилляции, электроэнцефалография, магнитоэнцефалография, альфа-ритм, тета-ритм, сложные задачи, мотивация, когнитивные способности

Основные положения:

➢ теория мотивационного усилия описывает нелинейную зависимость уровня вкладываемого усилия от уровня сложности задачи.
➢ исследования когнитивного механизма ментального усилия позволяют предположить связь мозговых осцилляций с феноменом усилия.
➢ модуляции выраженности связанных с задачей осцилляций, по всей видимости, согласуются с теорией мотивационной интенсивности.
➢ исследование осцилляторных коррелятов различных когнитивных процессов может развить теории, описывающие механизм модуляции усилия.

Финансирование
Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 17-78-30028.

Для цитирования: Жожикашвили, Н.А., Бакумова, А.Д., Бочковская И.А. (2022). Альфа- и тета- ритмы как маркеры когнитивного усилия. *Российский психологический журнал, 19*(2), 201–219. https://doi.org/10.21702/rpj.2022.2.15

Введение

Усилие является общей чертой повседневной жизни. Мы регулярно сталкиваемся с деятельностью, требующей тех или иных усилий, будь то бег к автобусной остановке, учеба или соблюдение неприятной диеты (Inzlicht et al., 2018). Требуемое усилие для этих действий можно определить как интенсификацию умственной или физической деятельности для достижения какой-либо цели (Eisenberger, 1992). Таким образом, это активный волевой процесс (Kahneman, 1973), который является посредником между тем, насколько хорошо индивид потенциально может выполнять какую-либо задачу, и тем, насколько хорошо он на самом деле выполняет эту задачу (Shenhav et al., 2017). Усилие выражается в интенсивности поведения при уже определенной мотивации, цели и условиях ее достижения. Степень вкладываемого усилия зависит не только от мотивации, но и от многих других внутренних и внешних факторов (Inzlicht et al., 2018; Shenhav et al., 2017).

Появившись в 1970х годах, теории об усилии продолжают развиваться и в последние годы, что показывает значимость и актуальность исследований природы усилия и механизмов его модуляции в области фундаментальной психологии. Данная статья посвящена исследованиям механизмов модуляции усилия, то есть факторов, определяющих интенсивность вкладываемого усилия. Конкретнее, нас интересует интенсивность ментального усилия, вкладываемого в выполнение когнитивных задач, то есть в умственную деятельность (Shenhav et al., 2017).

Современные авторы предполагают, что не все когнитивные процессы требуют усилия, при этом некоторые могут требовать больше усилия, чем другие. Выполнение любой задачи связано с выбором оптимального уровня усилия для данного процесса, то есть с распределением

усилия по процессам (Shenhav et al., 2017). Однако, природа этих ограничений, а также механизм распределения усилий остается неясным – авторы теоретических статей сами выдвигают гипотезы. Мы считаем, что исследования мозговых осцилляций могут способствовать пониманию процессов, стоящих за распределением и модуляцией усилий, так как они позволяют рассматривать корреляты отдельных нисходящих процессов (Buzsaki et al., 2012; Siegel et al., 2012).

В данной статье мы попытались связать современные теории усилия с известными данными о модуляции осцилляторных коррелятов когнитивных задач. Наша задача заключалась в описании и объединении двух отдельных теоретических направлений (теории мотивационной интенсивности и теорий ментального усилия), обосновании гипотезы о возможности интерпретировать осцилляции в терминах этих теорий и обзора существующих экспериментальных данных в контексте этих теорий.

Теоретическое обоснование

Ментальное усилие. Определение и базовые концепции

Концепция усилия необходима для того, чтобы объяснить следующий феномен: при выполнении разнообразных задач людям свойственно не реализовывать свои физические или умственные способности в полной мере. Так, например, введение вознаграждения часто повышает качество выполнения задач (Richter et al., 2016). Таким образом, результат выполнения задачи определяют не только способности человека, но и степень приложенных к ее выполнению усилий.

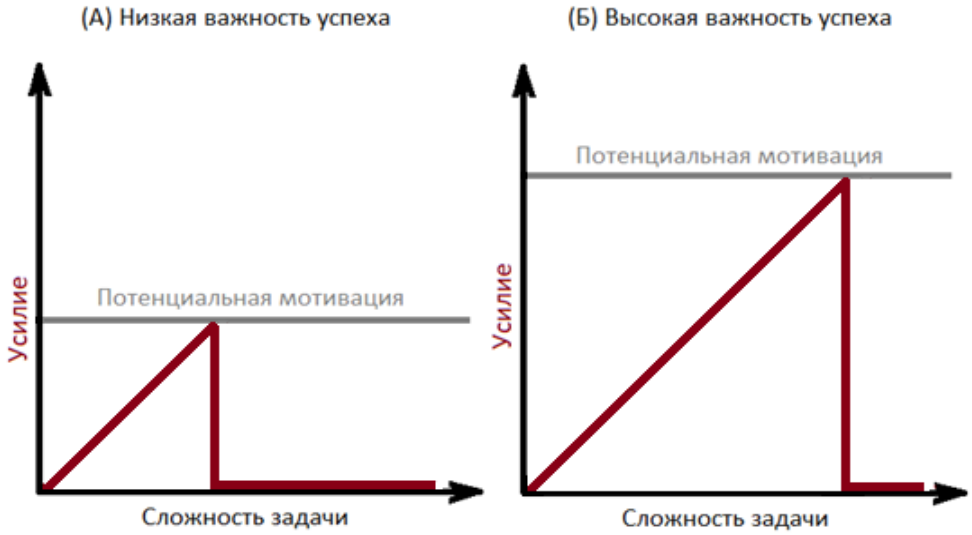
Существует несколько подходов к определению и изучению ментального усилия. Richter и коллеги определяют усилие как мобилизацию ресурсов для поддержания определенного поведения (Richter et al., 2016). Авторы рассматривают усилие в контексте теории мотивационной интенсивности Брема (Brehm & Self, 1989), в основе которой лежит принцип сохранения ресурсов. Теория интенсивности мотивации постулирует, что усилие возрастает при увеличении сложности задачи, в случае если успех возможен и усилия оправданы. При этом уровень усилия резко падает, если задача становится настолько сложной, что, с одной стороны, превышает возможности человека и делает успех слишком маловероятным, а с другой стороны, требует неоправданно высокого уровня мобилизации ресурсов (Brehm & Self, 1989). Таким образом, в соответствии с принципом сохранения ресурсов, теория интенсивности мотивации предсказывает резкое снижение усилий при выполнении особо сложных задач. Потенциальная мотивация – это гипотетический максимум усилий, которые оправданы и которые человек готов приложить для выполнения задачи. Этот показатель в свою очередь зависит от значимости успеха для человека (рис. 1) (Richter et al., 2016).

В ряде исследований, проверяющих теорию интенсивности мотивации, мобилизация усилий оценивалась при помощи фиксации физиологических реакций сердечно-сосудистой системы: показатель сердцебиения как период изоволюмического сокращения (cardiac pre-ejection period), систолическое артериальное давление, частота сердечных сокращений. Так было показано, что эти реакции становятся более выраженными с увеличением сложности когнитивных задач и резко снижаются в условиях, когда задача невыполнима (Richter et al., 2008; Gendolla и Richter, 2006; Smith, Baldwin and Christenson, 1990). При этом высокая мотивация предотвращает эффект падения усилия (Eubanks, Wright & Williams, 2002), а слишком низкая мотивация не приводит к росту усилия (Wright, Shaw, and Jones, 1990). Таким образом,

в этих исследованиях подтверждаются базовые положения теории – зависимость усилия от сложности задачи, возможности успеха и мотивации (Wright, 1996).

Рисунок 1

Предсказания теории мотивационной интенсивности для низкой (А) и высокой (Б) важности успеха (модифицированный рисунок, Richter et al., 2016).



Когнитивный механизм модуляции усилия

В подходе к объяснению феномена усилия с позиции теории интенсивности мотивации Брема ключевой механизм усилия заключается в увеличении интенсивности общей мотивации к выполнению задания (Brehm et al., 1989). Параллельно с описанными теориями и эмпирическими исследованиями, развиваются теории ментального усилия, объясняющие когнитивный механизм модуляции усилия.

Ментальное усилие определяется как посредник между, во-первых, сложностью задачи и когнитивными способностями субъекта и, во-вторых, итоговым качеством обработки информации (выражаемым во времени реакции и точности выполнения задачи) (Shenhav et al., 2017). Первые два фактора определяют потенциально достижимый уровень выполнения задачи. Ментальное усилие как промежуточный процесс влияет на фактически реализованный уровень выполнения.

Когнитивный механизм, объясняющий природу ментального усилия, ассоциирован с представлением о необходимости задействовать исполнительные функции (executive control functions) для контроля процессов переработки информации с разной степенью автоматизации (Earle et al., 2015; Luria, 1980). Регулярно повторяющиеся стереотипные процессы хорошо автоматизированы и требуют меньше усилий, в то время как процессы, связанные

вовлечением когнитивного контроля, требуют больше усилий (Botvinick & Cohen, 2015). В рамках этого подхода утверждается, что ключевая функция усилия – поддержание фокуса внимания на целях задания и предотвращение замещения их конкурирующими целями или отвлечения факторами внешней среды. Таким образом, характеристики задачи могут требовать различного уровня активации произвольного внимания или исполнительного компонента рабочей памяти (Kane & Engle, 2002), что в свою очередь влияет на необходимый для успешного выполнения объем приложенных усилий.

Наличие промежуточной переменной между когнитивными способностями и результатом выполнения задания объясняется ограниченностью ресурса, необходимого для распределения и поддержания контролируемых процессов (когнитивного контроля). Существует несколько теоретических объяснений ограничений объема и времени поддержания контроля. Среди факторов, объясняющих данные ограничения, есть ограниченные метаболические ресурсы мозга (Muraven, Tice & Baumeister, 1998), а также ограничения систем обработки информации самих по себе – возникновение интерференции из-за необходимости использовать общие процессы для различных задач (Musslick et al., 2016).

Достаточно доказательств того, что люди и животные избегают приложения усилий (Dreisbach & Fischer, 2015; Kool et al., 2010; Hull, 1943; Silvestrini, 2017). Многие авторы согласны с тем, что приложение усилия по своей природе неприятно и затратно, и связывают этот феномен с необходимостью экономить ограниченные ресурсы когнитивного контроля (Inzlicht et al., 2018).

Теории ментального усилия постулируют необходимость существования механизма распределения контроля между различными процессами на основе сигналов о необходимых затратах и возможности. Так, Shenhav и коллеги (2017) развивают теорию ожидаемой цены контроля (expected value of control). Данная теория предполагает регулировку необходимой интенсивности контроля и выбор процессов, которые необходимо контролировать. Для этого реализуется оценка необходимых затрат ограниченного ресурса и вероятности выгоды (Shenhav et al., 2013)

При выполнении задач, в которых необходимо прикладывать когнитивное усилие, задействуется сеть корковых структур, включающая в себя дорсальную часть передней поясной коры (ППК), островковую долю, латеральную префронтальную кору, латеральную теменную кору (Shenhav et al., 2013). Активность этих структур в большей степени выражена при выполнении заданий, в которых требуется удерживать произвольное внимание, удерживать информацию в кратковременной памяти, подавлять автоматические (доминантные) ответы (Power & Petersen, 2013). В целом, функции этих структур связывают с распределением контролируемых процессов, хотя конкретные функциональные роли отдельных областей обсуждаются. В некоторых моделях, объясняющих роль дорсальной ППК в распределении контроля, паттерны активности соотносят с определением уровня необходимого усилия (Shackman et al., 2011). Авторы теории цены контроля (EVC) предполагают, что роль мозговых структур, задействованных при решении задач, требующих контроля (включая дорсальную ППК), заключается в интеграции сигналов, необходимых для определения цены контроля, и распределении усилия между контролируемыми процессами (Shenhav et al., 2016). Возможность модуляции фронтальными отделами активности затылочных отделов при выполнении задач на когнитивных контроль показана, например, в работе Cohen и van Gaal (2013). Используя метод причинности по Грейнджеру, авторы показали, что нейронная сеть когнитивного контроля посылает нисходящие сигналы к сенсорным областям. Mikhailova

и др. (2021), анализируя направленную коннективность в тета- и альфа- ритме, также наблюдали когерентность, нисходящую от лобной коры к сенсорным областям при решении задачи на рабочую память. Таким образом, в терминах теории цены контроля, эффекты распределения усилия могут проявляться не только во фронтальных областях, связанных непосредственно с когнитивным контролем, но и в других областях коры, связанных с реализацией контролируемых процессов.

Таким образом, авторы связывают концепт ментального усилия с мозговыми коррелятами процессов когнитивного контроля. Когнитивный контроль выражается в различных модуляциях активности мозга. В этой статье мы рассматриваем модуляции электроэнцефалографических (ЭЭГ) и магнитоэнцефалографических (МЭГ) осцилляций. В первую очередь, когнитивный контроль связывают с активацией фронтального тета-ритма (4–7 Гц) и подавлением теменного альфа-ритма (8–13 Гц) (Pfurtscheller, 1977; Missonnier et al., 2006; Yordanova, Kolev & Polich, 2001), о которых будет сказано ниже. Исходя из этого, можно предположить, что эти корреляты выполнения сложных когнитивных задач могут отражать модуляции ментального усилия. В следующих секциях статьи мы рассматриваем осцилляторные корреляты выполнения задач, требующих исполнительных функций, как возможные показатели усилия, выводимые из описанных дополняющих друг друга теорий.

Значимость изучения осцилляций как коррелятов когнитивных процессов

На физиологическом уровне когнитивные процессы протекают в мозге благодаря взаимодействию между функционально специализированными, но широко распределенными популяциями нейронов, образующими сети. Это взаимодействие происходит за счет синхронизации колебаний мембранного потенциала нейронов, входящих в сеть (нейрональных осцилляций; Siegel et al., 2012). Методы ЭЭГ или МЭГ предоставляют информацию об изменении внеклеточного потенциала в коре мозга. Это позволяет детектировать нейрональные осцилляции и получать информацию о протекании когнитивных процессов с высоким временным разрешением (Buzsaki et al., 2012). Таким образом, изучение модуляций ЭЭГ/МЭГ осцилляций, связанных с выполнением когнитивных задач, может помочь исследователям обнаружить единое основание под различными на вид когнитивными процессами или, наоборот, разделить схожие процессы (Siegel et al., 2012).

Так, например, Richter и коллеги (2008) в своем исследовании модуляции усилия при выполнении задачи Стернберга на рабочую память использовали реакции сердечно-сосудистой системы как показатель усилия. Между тем, как и другие когнитивные задачи, задача Стернберга требует активации многих процессов, таких как кодирование стимула, удержание стимула в рабочей памяти, извлечение стимула из рабочей памяти (Sternberg, 1996). Частотно-временной анализ осцилляций, связанных с выполнением задачи Стернберга, позволяет разделить эти процессы (Wianda & Ross, 2019; Proskovec et al., 2019; Heinrichs-Graham & Wilson, 2015; Pavlov & Kotchoubey, 2021) и изучить их связь со сложностью задачи и мотивацией по отдельности. Поэтому изучение связанных с задачей осцилляций может позволить соотнести различные нисходящие когнитивные процессы с теориями усилия, и таким образом, развить понимание когнитивного механизма усилия.

Ниже мы показываем, что многочисленные исследования осцилляций, связанных с выполнением сложных когнитивных задач, согласуются с описанными теориями ментального усилия.

Результаты

Связь осцилляций со сложностью задачи

В обозреваемых исследованиях участники, в основном, выполняют задачи на рабочую память – задачу Стернберга и n-back задачу, поскольку такие задачи имеют несколько уровней сложности. Выполнение обеих задач связано с относительным повышением мощности (синхронизацией) тета-ритма (4–7 Гц) и относительным снижением мощности (десинхронизацией) альфа-ритма (8–13 Гц; Klimesch et al., 2005). Оба эти эффекта традиционно интерпретируются как корреляты активации когнитивного контроля, нисходящего внимания или исполнительных функций рабочей памяти (Klimesch et al., 1998; Cohen & Donner, 2013; Sauseng et al., 2010).

В большинстве исследований анализ мощности альфа- и тета ритмов показывает синхронизацию тета-ритма и десинхронизацию альфа-ритма при увеличении сложности задания. Так, чувствительность десинхронизации альфа-ритма к изменениям сложности задания была показана в исследовании Stipacek и соавторов (2003). Участники исследования выполняли задачу на кратковременную память, требующую запоминать и воспроизводить последовательности цифр (три или пять цифр), и задачу на рабочую память, требующую также дополнительных манипуляций цифрами (счета). В обоих заданиях с увеличением сложности усиливалась десинхронизация быстрого альфа-ритма, наиболее выраженная в задних отделах головного мозга. В задании на кратковременную память этот паттерн был заметнее, чем в задании на рабочую память.

Линейное увеличение как относительной, так и тонической (абсолютной) мощности фронтального тета-ритма с ростом нагрузки на рабочую память было также показано в исследовании Zakrzewska и Brzezicka (2014). Участники исследования выполняли задачу Стернберга, требующую запомнить от двух до пяти цифр.

В исследовании Gevins и соавторов (1997) участники исследования выполняли n-back задание с двумя уровнями сложности: 1-back и 3-back. В n-back задании участникам предъявляется последовательность символов и требуется ответить, встречался ли предъявляемый стимул среди предыдущих n символов. Мощность тета-ритма в срединной фронтальной области была выше в ситуации сложного условия по сравнению с легким. Также нижний альфа-ритм (8–10.5 Гц) в теменной области и верхний альфа-ритм (10–13.5 Гц) в теменно-затылочной были более выражены в ситуации легкого условия. В другом исследовании Gevins с соавторами (1998) участники выполняли пространственную и вербальную версии n-back задания Было показано, что с ростом сложности заданий увеличивается мощность фронтального тета-ритма, уменьшается мощность альфа-ритма в теменно-височно-затылочной области и мощность бета-ритма в центральной области.

Усиление депрессии центрально-фронтального бета-ритма при усложнении задачи также обнаружили Pavlova et al. (2019). Используемая лингвистическая задача требовала извлечения глагола из семантической памяти. Участник должен был назвать ассоциирующийся глагол в ответ на существительное. Сложность регулировалась количеством возможных ассоциаций. Подавление бета-ритма авторы интерпретировали как увеличение уровня усилия при активации семантико-моторной ассоциации.

В исследовании Scheeringa и коллеги (2009), участники выполняли задание Стернберга, в котором длина последовательности варьировалась от нуля до семи согласных. При росте сложности задания наблюдалось увеличение мощности заднего альфа-ритма и увеличение мощности фронтального тета-ритма в период удержания информации в рабочей памяти.

Повышение мощности фронтального тета-ритма при усложнении задачи также было получено с использованием задачи Стернберга, в которой количество букв в кодируемой последовательности варьировалось от одной до четырех (Gundel & Wilson, 1992).

Используя метод машинного обучения, Горюшко и Самочадин (2018) создали классифицирующую модель, определяющую степень когнитивной нагрузки по выраженности фонового тета-ритма. В эксперименте была использована задача Стернберга, включающая от двух до десяти согласных. Результат этого эксперимента говорит о положительной связи между мощностью тета-ритма и уровнем сложности задачи.

Не только снижение, но и повышение мощности альфа-ритма может быть необходимо для выполнения сложных когнитивных задач. Scheeringa и коллеги обнаружили усиление синхронизации мощности заднего альфа-ритма при усложнении задачи Стернберга (Scheeringa et al., 2009). Авторы объясняют полученную закономерность гипотезой о связи мощности альфа-ритма с нисходящим функциональным торможением областей, нарушающих процесс удержания информации в рабочей памяти. Гипотезу о роли альфа-ритма в поддержании рабочей памяти проверяли Bonnefond и Jensen (2012). В исследовании участники выполняли модифицированную задачу Стернберга, включающую дистракторы (отвлекающие стимулы) в периоде удержания. Было показано, что мощность альфа-ритма в височно-затылочной области возрастает при ожидании дистрактора. Повышенная мощность альфа-ритма в этот период также предсказывала лучшие результаты выполнения задания.

В описанных исследованиях наблюдались линейные зависимости между осцилляторными коррелятами и сложностью задачи. Такие зависимости позволяют сделать лишь вывод о связи данных коррелятов с когнитивной нагрузкой. Их недостаточно для доказательства связи данных коррелятов с мотивацией и теориями усилия. Однако в последнее время появляются первые исследования, использующие очень сложные уровни задач и получившие нелинейные зависимости, которые уже нельзя объяснить исключительно когнитивной нагрузкой. Такое влияние увеличения уровня сложности заданий на модуляцию осцилляций показано в исследовании Fairclough и Ewing (2017) и Fairclough et al. (2019). Участники выполняли n-back задние на трех уровнях сложности (простой n = 1, сложный n = 4, очень сложный n = 7). Мощность фронтального медиального тета-ритма возрастала от простого условия к сложному и снова снижалась к очень сложному. Аналогичные результаты были получены для альфа-ритма: депрессия альфа-ритма была наиболее выражена в сложных условиях (n = 4) и уменьшалась при простых и очень сложных условиях (n = 1 и n = 7). Последние результаты являются аргументом в пользу связи затылочно-теменной альфа-депрессии и фронтальной тета-активации с усилием в контексте теории мотивационной интенсивности.

Данная статья посвящена осцилляторным коррелятам выполнения когнитивных задач. Такие корреляты отражают продолжительную активность коры, связанную с реализацией когнитивных процессов. Тем не менее, важно отметить, что ЭЭГ-исследования вызванных потенциалов, связанных со стимулом, (Nidal & Malik, 2014) также согласуются с исследованиями осцилляций. Так, многие исследования обнаруживали возрастание амплитуды различных компонентов вызванного потенциала при возрастании сложности задачи (Koshkin et al., 2018; Pavlova et al., 2017; Shelepin et al., 2009). При этом, в особо сложных условиях наблюдалось падение амплитуды компонента P3, связанного с высокоуровневой обработкой стимула (Johannes et al., 2021).

Аналогичные результаты были показаны и в других исследованиях осцилляций, но лишь для определенных групп испытуемых, эти исследования будут описаны ниже.

Влияние мотивации на осцилляторные корреляты выполнения когнитивных задач

В согласии с теорией мотивационной интенсивности, альфа- и тета-корреляты выполнения когнитивных задач усиливаются при повышении награды за успех (Glazer et al., 2018). В условиях ожидании награды наблюдается усиленная десинхронизация теменно-затылочного альфа-ритма, связанного с оцениванием стимула, ожиданием обратной связи (Bastiaansen, 1999; Bastiaansen, 2001; Pornpattananangkul & Nusslock, 2016), выполнением задачи n-back на рабочую память (Fairclough & Ewing, 2017) и задачи Струпа на когнитивный контроль (van den Berg et al., 2014). Авторы проинтерпретировали такие результаты как усиление внимания при повышенной мотивации выполнять задачу.

Более спорные результаты были получены относительно фронтального тета-ритма как главного коррелята выполнения сложных когнитивных задач (Glazer et al., 2018). Некоторые авторы обнаружили усиление мощности фронтального тета-ритма, связанного с кодированием стимула в рабочей памяти, при повышенной награде (Gruber et al., 2013), в то время как другие не обнаружили такой связи (Fairclough & Ewing, 2017). Knyazev и Slobodskoy-Plusnin (2009) показали, что связь фронтального тета-ритма с ожиданием награды или наказания зависит от внутренней чувствительности к награде или наказанию. Гипотетически такой результат может объяснять спорные данные о связи тета-ритма и мотивации.

Существуют также данные об усилении десинхронизации альфа-ритма и синхронизации тета-ритма, связанных с кодированием стимула, при повышенной внутренней мотивации (Phukhachee et al., 2019; Ermakov & Vorobyeva).

Связь обозреваемых ЭЭГ-коррелятов с теорией мотивационной интенсивности возможно предположить также при изучении индивидуальных различий испытуемых. Ниже описываются противоречивые результаты исследований, фокусирующихся на индивидуальных различиях в модуляции мозговой активности в зависимости от сложности задачи, и объясняется возможное разрешение противоречий при уделении внимания мотивационным особенностям испытуемых.

Исследования о связи ЭЭГ-коррелятов выполнения задач с интеллектом также парадоксально приводят к гипотезе о связи этих показателей с мотивацией испытуемых. У испытуемых с высоким уровнем интеллекта или высокой точностью ответов наблюдается пониженная десинхронизация альфа-ритма, связанного с выполнением задач на логическое мышление и запоминание (Neubauer & Fink, 2009; Neubauer et al., 1995; Jaušovec, 1996; Vogt et al., 1998; Jaušovec, 2000; Станкова и Мышкин, 2016). Авторы объясняют этот феномен гипотезой нейрональной эффективности. Согласно гипотезе, более способные испытуемые склонны к более эффективной обработке информации и могут выполнять задачи, тратя меньше ресурсов и проявляя меньше ментальной активности (Neubauer & Fink, 2009; Jaušovec, 2000). Подтверждения этой гипотезе были получены и при анализе тета-коррелятов выполнения задач (Doppelmayr et al., 1998; Karatygin N. A. et al., 2022). Стоит отметить, что эффект нейрональной эффективности не противоречит современной теории мотивационной интенсивности. Согласно авторам теории, более способные испытуемые вкладывают меньше усилия при выполнении несложных задач (Richter et al., 2016). Однако другие исследования показали обратный эффект, продемонстрировав усиленную десинхронизацию альфа-ритма у испытуемых с высоким уровнем интеллекта или высокой точностью ответов (Doppelmayr et al., 2005; Grabner, Neubauer & Stern, 2006; Klimesch et al., 2007; Jaušovec & Jaušovec, 2005; Белоусова, Разумникова и Вольф, 2015). В этих исследованиях использовались задачи на запоминание, а также на логическое

и пространственное мышление. Объясняя полученный эффект, авторы предполагают, что люди с высокими способностями демонстрируют более эффективное функционирование мозга, то есть имеют доступ к большему количеству ресурсов, что позволяет им решать более сложные задачи.

Отдельные исследования также показали, что разница в активации теменной коры между группами испытуемых с высоким и средним уровнем интеллекта зависит от уровня сложности задачи. В этих исследованиях использовались задачи на аналитическое и фигуративное мышление. Десинхронизация альфа-ритма (Doppelmayr et al., 2005; Hanslmayr, 2005), как и усиление фМРТ сигнала (Preusse et al., 2011; Perfetti et al., 2009), интерпретировались как повышение активации коры мозга, необходимое для выполнения задачи. Для простых задач наблюдался эффект нейрональной эффективности. Для сложных задач наблюдался обратный эффект – повышение активации коры у способных испытуемых, и тренд к понижению у менее способных. Такой тренд может объясняться падением усилия у менее способных испытуемых, рассматривающих трудные задачи как не стоящие больших когнитивных затрат.

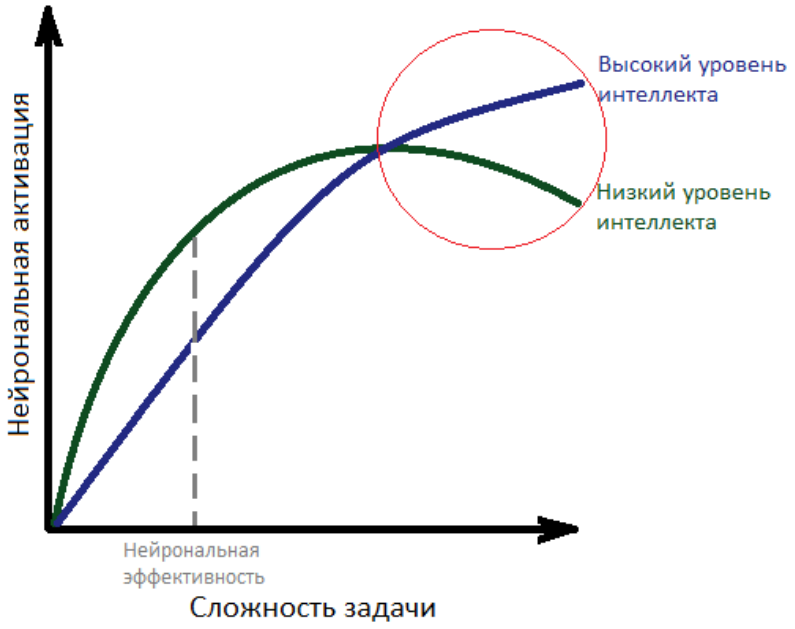
Аналогичный феномен был получен и для тета-ритма как коррелята выполнения задачи Стернберга (Pavlov & Kotchoubey, 2017). Авторы проанализировали связь мощности тета-ритма с несколькими уровнями сложности задачи: запоминание от пяти до семи букв при наличии манипуляцияи ими в рабочей памяти. Мощность тета-ритма планомерно возрастала со сложностью задачи только у испытуемых с высокой точностью ответов. У испытуемых с низкой точностью мощность тета-ритма падала при наиболее сложном условии задачи. Авторы предположили два объяснения такому различию модуляции тета-ритма между группами. Возможно, менее способные испытуемые не имели возможности использовать необходимое количество требуемых ресурсов для выполнения самого сложного уровня задачи. Поэтому они прибегали к изменению стратегии на менее ресурсозатратную. Другое объяснение – падение усилия у менее способных испытуемых при наиболее сложном условии, связанное с пониженной мотивацией выполнять задачу.

Таким образом, описанные индивидуальные различия в альфа- и тета- модуляциях могут объясняться как эффектом достигнутого потолка, так и эффектом падения усилия при недостатке мотивацией.

В пользу второго объяснения говорят данные ПЭТ-исследования Larson и коллег (1995). Авторы сравнили ПЭТ-активацию у испытуемых с высоким и средним показателями интеллекта. ПЭТ-активация возрастала у испытуемых с высоким интеллектом, когда задача становилась сложной. При этом у испытуемых со средним уровнем интеллекта активность понижалась. Для всех испытуемых авторы использовали условия субъективной сложности: легкая задача – 90 % правильных ответов, сложная задача – 75 %. Таким образом, авторы нивелировали влияние на результаты когнитивных способностей испытуемых – задачи были одинаково сложные для всех испытуемых в легком и сложном условии. Обнаруженная разница в модуляции активности мозга между группами испытуемых может быть объяснена скорее их различными реакциями на высокий уровень субъективной сложности, чем самим уровнем интеллекта. Эта зависимость может объясняться уровнем мотивации выполнять сложную задачу, который различается у более и менее способных испытуемых (Larson et al.,1995; Neubauer и Fink, 2009). При этом пониженную активность мозга, так же как и деактивацию альфа-ритма, у испытуемых с высоким интеллектом при выполнении наиболее простых задач, авторы объясняли эффектом нейрональной эффективности, то есть когнитивными различиями (рис. 2).

Рисунок 2

Зависимость активации мозга от сложности задачи (модифицированный рисунок, Neubauer & Fink, 2009).



Авторы предполагают, что на наиболее сложных уровнях задачи проявляются эффекты мотивации и эмоциональной реакции на сложность. Данный эффект (выделен кругом) хорошо объясняется теорией мотивационной интенсивности.

Описанные эффекты хорошо объясняются описанными теориями усилия: у менее мотивированных выполнять сложную задачу испытуемых наблюдается эффект снижения вкладываемого усилия в условиях повышенной сложности. На сегодняшний день не проведено аналогичных исследований, фокусирующихся на мозговых осцилляциях, связанных с выполнением задачи. Тем не менее, исходя из описанных выше исследований осцилляций и индивидуальных различий, логично предположить, что для осцилляторных коррелятов нисходящих когнитивных процессов должен наблюдаться аналогичный эффект. Выраженность этих осцилляций должна усиливаться при усложнении задачи, но падать в особо сложных условиях у испытуемых с низкой мотивацией. Для проверки этих гипотез требуются дальнейшие исследования осцилляторных коррелятов различных нисходящих процессов и их зависимости от субъективной сложности задачи. При этом должны учитываться когнитивные способности и уровень мотивации испытуемых. Под мотивацией мы имеем в виду как внешнюю, так и внутреннюю, как ситуативную, так и личностную, включая, в частности, и уровень уверенности в своих силах.

Обсуждение результатов

Обобщая известные теории усилия, можно сделать следующие выводы. Когнитивное усилие определяет затраты ограниченных когнитивных ресурсов на выполнение задач, которые требуют сложных нисходящих когнитивных процессов. Когнитивное усилие возрастает при усложнении этих задач до тех пор, пока задача не становится неоправданно сложной. На определение этого критического уровня сложности, при котором наблюдается падение усилия, влияет уровень мотивации к успеху.

Обобщая исследования, анализирующие связь мощности осцилляторных коррелятов когнитивных процессов со сложностью задачи, мотивацией и когнитивными способностями, можно сделать следующие выводы. Данные спектральные показатели могут модулироваться в соответствии с описанными теоретическими положениями, и, следовательно, могут отражать ментальное усилие. Основные осцилляторные корреляты выполнения сложных когнитивных задач – синхронизация фронтального тета-ритма (обобщенно интерпретируемая как активация исполнительного контроля) и десинхронизация заднего альфа-ритма (обобщенно интерпретируемая как активация контролируемого внимания). Согласно теориям ментального усилия, эти процессы напрямую связаны с процессом распределения усилия при выполнении задачи. Выраженность этих осцилляторных эффектов возрастает при усложнении задач. При этом в условиях наиболее сложных задач на уровень выраженности этих осцилляций, предположительно, влияет мотивация. Предположительно, менее мотивированные испытуемые демонстрируют понижение выраженности данных коррелятов. Такой эффект объясняется падением уровня вкладываемого усилия согласно теории мотивационной интенсивности и согласуется с теориями ментального усилия.

Изучение осцилляторных коррелятов различных когнитивных процессов позволит расширить понимание нейрональных основ когнитивного усилия и связи усилия с различными когнитивными функциями. Поскольку осцилляторные показатели позволяют исследователям выделять корреляты отдельных когнитивных процессов, такие исследования позволят расширить понимание когнитивного механизма, отвечающего за распределение усилия.

В настоящее время исследований, проверяющих описанные гипотезы, практически нет. Обзор литературы показал, что исследователи крайне редко используют в экспериментах задачи с большой вариативностью сложности, включая как очень простые, так и очень сложные условия. Однако для выявления эффектов возрастания усилия при усложнении задачи и падения усилия при неоправданно сложной задаче экспериментальная задача должна иметь много уровней сложности. Наибольший интерес для данной области исследований вызывает не объективная, а субъективная сложность задачи, поскольку связанные с ней модуляции усилия не будут объясняться когнитивными способностями. Поэтому их можно будет объяснять влиянием эмоционально-мотивационных аспектов. Необходимо подбирать условия сложности так, чтобы при усложнении задачи максимальное количество испытуемых демонстрировали снижение качества выполнения до уровня случайных угадываний. Это обеспечит возможность проверить гипотезу о снижении осцилляторных эффектов в условии максимальной субъективной сложности.

Также для подобных исследований необходим корректный выбор задачи с учетом когнитивных процессов, которые она требует, и их известных осцилляторных коррелятов. Задача должна позволять диссоциацию коррелятов разных процессов либо по их частотному диапозону,

либо по их временному периоду. Например, задача n-back требует одновременной активации процесса кодирования релевантной и процесса подавления нерелевантной информации, выражающихся в десинхронизации и синхронизации альфа-ритма соответственно. Это приводит к смешению коррелятов этих двух процессов и неясным результатам (Klimesch, Schack & Sauseng, 2005). В то время как задача Стернберга, например, позволяет разделить используемые процессы кодирования, удержания и извлечения информации из рабочей памяти. Многие описанные исследования анализировали лишь общую десинхронизацию альфа-ритма как показателя активации коры. Такие исследование могут быть проведены и с другими методами измерения активации коры, поэтому они согласуются с данными фМРТ и ПЭТ-исследований (например, Bekhtereva et al., 2000; Хараузов и др., 2018). Однако мы предлагаем использовать ЭЭГ и МЭГ-методы, обладающими высоким временным разрешением, чтобы изучать связь отдельных когнитивных процессов с модуляцией усилия.

Также на сегодняшний день не хватает исследований, анализирующих влияние мотивации на осцилляторные эффекты, связанные с выполнением задач разной сложности. В исследования на данную тему следует включать различные показатели внутренней и внешней мотивации как фактора, определяющего модуляцию усилия в условиях особо сложных задач. Анализ влияния уровня мотивации на выраженность эффектов при учете уровня сложности задачи должен показать связь данных эффектов с теорией мотивационной интенсивности. Обнаружение различных зависимостей между этими переменными, так же как и обнаружение различных зависимостей для разных типов мотивации, поможет развить понимание механизма распределения усилия в условиях сложных задач.

Заключение

Согласно теории мотивационной интенсивности, степень вкладываемого в выполнение задачи усилия зависит от оцениваемой субъективной сложности задачи и мотивации выполнять задачу.

Теории, описывающие когнитивный механизм ментального усилия, позволяют предположить связь осцилляций как коррелятов контролируемых когнитивных процессов с феноменом усилия.

Модуляции выраженности связанных с выполнением задач осцилляций (таких как синхронизация фронтального тета-ритма и десинхронизация теменного альфа-ритма), по всей видимости, согласуются с теорией мотивационной интенсивности. Обзор существующих исследований показывает нелинейную зависимость этих осцилляций от сложности задачи и индивидуальные различия в этой зависимости. Эти эффекты можно объяснить влиянием мотивационно-эмоциональных особенностей испытуемых в контексте теории мотивационной интенсивности. Однако на сегодняшний день не хватает корректных исследований для уверенного подтверждения этих гипотез.

Исследование осцилляторных коррелятов выполнения когнитивных задач может помочь развить теории, описывающие механизм распределения и модуляции усилия за счет соотнесения теорий с отдельными когнитивными процессами.

Литература

Белоусова, Л. В., Разумникова, О. М., & Вольф, Н. В. (2015). Возрастные особенности связи интеллекта и характеристик ЭЭГ. *Журнал высшей нервной деятельности им. ИП Павлова*, 65(6), 699-699.

Горюшко, С. М., & Самочадин, А. В. (2018). Средства оценки уровня когнитивной нагрузки в процессе обучения. *Компьютерные инструменты в образовании*, (4), 35-44.

Станкова, Е. П., & Мышкин, И. Ю. (2016). О связи индивидуальных характеристик электроэнцефалограммы с уровнем интеллекта. *Вестник Московского университета*. Серия 16. Биология, (4), 83-88.

Харазов, А. К., Васильев, П. П., Соколов, А. В., Фокин, В. А., & Шелепин, Ю. Е. (2018). Анализ изображений функциональной магнитно-резонансной томографии головного мозга человека в задачах распознавания текстур. *Оптический журнал*, 85(8), 22-28.

Atkinson, J. W. (1957). Motivational determinants of risk-taking behavior. Psychological review, 64(6p1), 359.

Bastiaansen, M. C., Böcker, K. B., Cluitmans, P. J., & Brunia, C. H. (1999). Event-related desynchronization related to the anticipation of a stimulus providing knowledge of results. *Clinical Neurophysiology*, *110*(2), 250-260.

Bastiaansen, M. C., & Brunia, C. H. (2001). Anticipatory attention: an event-related desynchronization approach. *International Journal of Psychophysiology*, *43*(1), 91-107.

Bekhtereva, N. P., Starchenko, M. G., Klyucharev, V. A., Vorob'ev, V. A., Pakhomov, S. V., & Medvedev, S. V. (2000). Study of the brain organization of creativity: II. Positron-emission tomography data. *Human Physiology*, 26(5), 516-522.

Bonnefond, M., & Jensen, O. (2012). Alpha oscillations serve to protect working memory maintenance against anticipated distracters. *Current biology*, *22*(20), 1969-1974.

Botvinick, M. M., & Cohen, J. D. (2014). The computational and neural basis of cognitive control: charted territory and new frontiers. *Cognitive science*, *38*(6), 1249-1285.

Brehm, J. W., & Self, E. A. (1989). The intensity of motivation. *Annual review of psychology*, *40*(1), 109-131.

Buzsáki, G., Anastassiou, C. A., & Koch, C. (2012). The origin of extracellular fields and currents—EEG, ECoG, LFP and spikes. *Nature reviews neuroscience*, *13*(6), 407-420.

Cohen, M. X., & Donner, T. H. (2013). Midfrontal conflict-related theta-band power reflects neural oscillations that predict behavior. *Journal of neurophysiology*, *110*(12), 2752-2763.

Cohen, M. X., & Van Gaal, S. (2013). Dynamic interactions between large-scale brain networks predict behavioral adaptation after perceptual errors. *Cerebral Cortex*, *23*(5), 1061-1072.

Doppelmayr, M., Klimesch, W., Hödlmoser, K., Sauseng, P., & Gruber, W. (2005). Intelligence related upper alpha desynchronization in a semantic memory task. *Brain Research Bulletin*, *66*(2), 171-177.

Doppelmayr, M., Klimesch, W., Schwaiger, J., Auinger, P., & Winkler, T. (1998). Theta synchronization in the human EEG and episodic retrieval. *Neuroscience letters*, *257*(1), 41-44.

Dreisbach, G., & Fischer, R. (2015). Conflicts as aversive signals for control adaptation. *Current Directions in Psychological Science*, *24*(4), 255-260.

Earle, F., Hockey, B., Earle, K., & Clough, P. (2015). Separating the effects of task load and task motivation on the effort–fatigue relationship. *Motivation and Emotion*, *39*(4), 467-476.

Eisenberger, R. (1992). Learned industriousness. Psychological review, 99(2), 248.

Ermakov, P. N., & Vorobyeva, E. V. (2011). Achievement motivation and EEG spectral power. *Psychology in Russia: State of the art*, 4, 448-464.

Eubanks, L., Wright, R. A., & Williams, B. J. (2002). Reward influence on the heart: Cardiovascular response as a function of incentive value at five levels of task demand. *Motivation and Emotion*, *26*(2), 139-152.

Fairclough, S., Ewing, K., Burns, C., & Kreplin, U. (2019). Neural efficiency and mental workload: locating the red line. In *Neuroergonomics* (pp. 73-77). Academic Press.

Fairclough, S. H., & Ewing, K. (2017). The effect of task demand and incentive on neurophysiological and cardiovascular markers of effort. *International Journal of Psychophysiology*, *119*, 58-66.

Frederick, S. (2005). Cognitive reflection and decision making. Journal of Economic perspectives, 19(4), 25-42.

Gendolla, G. H., & Richter, M. (2006). Ego-involvement and the difficulty law of motivation: Effects on performance-related cardiovascular response. *Personality and Social Psychology Bulletin*, *32*(9), 1188-1203.

Gevins, A., Smith, M. E., McEvoy, L., & Yu, D. (1997). High-resolution EEG mapping of cortical activation related to working memory: effects of task difficulty, type of processing, and practice. *Cerebral cortex (New York, NY: 1991)*, *7*(4), 374-385.

Gevins, A., Smith, M. E., Leong, H., McEvoy, L., Whitfield, S., Du, R., & Rush, G. (1998). Monitoring working memory load during computer-based tasks with EEG pattern recognition methods. *Human factors*, *40*(1), 79-91.

Glazer, J. E., Kelley, N. J., Pornpattananangkul, N., Mittal, V. A., & Nusslock, R. (2018). Beyond the FRN: Broadening the time-course of EEG and ERP components implicated in reward processing. *International Journal of Psychophysiology*, *132*, 184-202.

Grabner, R. H., Neubauer, A. C., & Stern, E. (2006). Superior performance and neural efficiency: The impact of intelligence and expertise. *Brain research bulletin*, *69*(4), 422-439.

Gruber, M. J., Watrous, A. J., Ekstrom, A. D., Ranganath, C., & Otten, L. J. (2013). Expected reward modulates encoding-related theta activity before an event. *Neuroimage*, *64*, 68-74.

Gundel, A., & Wilson, G. F. (1992). Topographical changes in the ongoing EEG related to the difficulty of mental tasks. *Brain topography*, *5*(1), 17-25.

Heinrichs-Graham, E., & Wilson, T. W. (2015). Spatiotemporal oscillatory dynamics during the encoding and maintenance phases of a visual working memory task. *Cortex*, *69*, 121-130.

Hull, C. L. (1943). Principles of behavior: An introduction to behavior theory.

Inzlicht, M., Shenhav, A., & Olivola, C. Y. (2018). The effort paradox: Effort is both costly and valued. *Trends in cognitive sciences*, *22*(4), 337-349.

Jaušovec, N. (2000). Differences in cognitive processes between gifted, intelligent, creative, and average individuals while solving complex problems: An EEG study. *Intelligence*, *28*(3), 213-237.

Jaušovec, N. (1996). Differences in EEG alpha activity related to giftedness. *Intelligence*, *23*(3) , 159-173.

Jaušovec, N., & Jaušovec, K. (2005). Differences in induced gamma and upper alpha oscillations in the human brain related to verbal/performance and emotional intelligence. *International Journal of Psychophysiology*, *56*(3), 223-235.

Kahneman, D. (1973). Attention and effort (Vol. 1063, pp. 218-226). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

Kane, M. J., & Engle, R. W. (2002). The role of prefrontal cortex in working-memory capacity, executive attention, and general fluid intelligence: An individual-differences perspective. *Psychonomic bulletin & review*, *9*(4), 637-671.

Karatygin, N. A., Korobeinikova, I. I., Venerin, A. A., & Alexandrov, Y. I. (2022). Spectral Characteristics of the EEG Theta-Band and Efficiency of Cognitive Test "N-Back" Performing. *Experimental Psychology* (Russia), 15(2), 95-110.

Klimesch, W. (1999). EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis. *Brain research reviews*, *29*(2-3), 169-195.

Klimesch, W., Doppelmayr, M., Pachinger, T., & Russegger, H. (1997). Event-related desynchronization in the alpha band and the processing of semantic information. *Cognitive Brain Research*, *6*(2), 83-94.

Klimesch, W., Doppelmayr, M., Russegger, H., Pachinger, T., & Schwaiger, J. (1998). Induced alpha band power changes in the human EEG and attention. *Neuroscience letters*, *244*(2), 73-76.

Klimesch, W., Schack, B., & Sauseng, P. (2005). The functional significance of theta and upper alpha oscillations. *Experimental psychology*, *52*(2), 99-108.

Knyazev, G. G., & Slobodskoy-Plusnin, J. Y. (2009). Substance use underlying behavior: investigation of theta and high frequency oscillations in emotionally relevant situations. *Clinical EEG and neuroscience*, 40(1), 1-4.

Kool, W., McGuire, J. T., Rosen, Z. B., & Botvinick, M. M. (2010). Decision making and the avoidance of cognitive demand. *Journal of experimental psychology: general*, *139*(4), 665.

Koshkin, R., Shtyrov, Y., Myachykov, A., & Ossadtchi, A. (2018). Testing the efforts model of simultaneous interpreting: An ERP study. *PloS one*, 13(10), e0206129.

Larson, G. E., Haier, R. J., LaCasse, L., & Hazen, K. (1995). Evaluation of a "mental effort" hypothesis for correlations between cortical metabolism and intelligence. *Intelligence*, *21*(3), 267-278.

Luria, A. R. (1980). Higher cortical functions in man (2nd ed.). *New York: Basic*.

Mikhailova, E. S., Kurgansky, A. V., Nushtaeva, R. A., Gerasimenko, N. Y., & Kushnir, A. B. (2021, September). Intracortical Directed Connectivity for Information Retention in Visual–Spatial Working Memory. In *Doklady Biological Sciences* (Vol. 500, No. 1, pp. 133-137). Pleiades Publishing.

Missonnier, P., Deiber, M. P., Gold, G., Millet, P., Gex-Fabry Pun, M., Fazio-Costa, L., ... & Ibáñez, V. (2006). Frontal theta event-related synchronization: comparison of directed attention and working memory load effects. *Journal of neural transmission*, *113*(10), 1477-1486.

Muraven, M., Tice, D. M., & Baumeister, R. F. (1998). Self-control as a limited resource: regulatory depletion patterns. *Journal of personality and social psychology*, *74*(3), 774.

Musslick, S., Dey, B., Özcimder, K., Patwary, M. M. A., Willke, T. L., & Cohen, J. D. (2016, August). Controlled vs. Automatic Processing: A Graph-Theoretic Approach to the Analysis of Serial vs. Parallel Processing in Neural Network Architectures. In *CogSci*.

Neubauer, A. C., & Fink, A. (2009). Intelligence and neural efficiency: Measures of brain activation versus measures of functional connectivity in the brain. *Intelligence*, *37*(2), 223-229.

Neubauer, A., Freudenthaler, H. H., & Pfurtscheller, G. (1995). Intelligence and spatiotemporal patterns of event-related desynchronization (ERD). *Intelligence*, *20*(3), 249-266.

Nidal, K., & Malik, A. S. (Eds.). (2014). EEG/ERP analysis: methods and applications. *Crc Press*.

Obrist, P. A. (2012). *Cardiovascular psychophysiology: A perspective*. Springer Science & Business Media.

Osaka, M. (1984). Peak alpha frequency of EEG during a mental task: Task difficulty and hemispheric differences. *Psychophysiology*, *21*(1), 101-105.

Pavlov, Y. G., & Kotchoubey, B. (2017). EEG correlates of working memory performance in females. *BMC neuroscience*, *18*(1), 1-14.

Pavlov, Y. G., & Kotchoubey, B. (2021). Temporally distinct oscillatory codes of retention and manipulation of verbal working memory. *European Journal of Neuroscience*, *54*(7), 6497-6511.

Pavlova, A. A., Butorina, A. V., Nikolaeva, A. Y., Prokofyev, A. O., Ulanov, M. A., Bondarev, D. P., &

Stroganova, T. A. (2019). Effortful verb retrieval from semantic memory drives beta suppression in mesial frontal regions involved in action initiation. *Human brain mapping*, 40(12), 3669-3681.

Pavlova, A. A., Butorina, A. V., Nikolaeva, A. Y., Prokofyev, A. O., Ulanov, M. A., & Stroganova, T. A. (2017). Not all reading is alike: task modulation of magnetic evoked response to visual word. *Psychology in Russia*, 10(3), 190.

Perfetti, B., Saggino, A., Ferretti, A., Caulo, M., Romani, G. L., & Onofrj, M. (2009). Differential patterns of cortical activation as a function of fluid reasoning complexity. *Human brain mapping*, *30*(2), 497-510.

Pessiglione, M., Vinckier, F., Bouret, S., Daunizeau, J., & Le Bouc, R. (2018). Why not try harder? Computational approach to motivation deficits in neuro-psychiatric diseases. *Brain*, *141*(3), 629-650.

Pfurtscheller, G. (1977). Graphical display and statistical evaluation of event-related desynchronization (ERD). *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, *43*(5), 757-760.

Phukhachee, T., Maneewongvatana, S., Angsuwatanakul, T., Iramina, K., & Kaewkamnerdpong, B. (2019). Investigating the effect of intrinsic motivation on alpha desynchronization using sample entropy. *Entropy*, *21*(3), 237.

Pornpattananangkul, N., & Nusslock, R. (2016). Willing to wait: Elevated reward-processing EEG activity associated with a greater preference for larger-but-delayed rewards. *Neuropsychologia*, *91*, 141-162.

Power, J. D., & Petersen, S. E. (2013). Control-related systems in the human brain. *Current opinion in neurobiology*, *23*(2), 223-228.

Preusse, F., Van Der Meer, E., Deshpande, G., Krueger, F., & Wartenburger, I. (2011). Fluid intelligence allows flexible recruitment of the parieto-frontal network in analogical reasoning. *Frontiers in human neuroscience*, *5*, 22.

Proskovec, A. L., Heinrichs-Graham, E., & Wilson, T. W. (2019). Load modulates the alpha and beta oscillatory dynamics serving verbal working memory. *NeuroImage*, *184*, 256-265.

Richter, M., & Gendolla, G. H. (2009). The heart contracts to reward: Monetary incentives and preejection period. *Psychophysiology*, *46*(3), 451-457.

Richter, M., Gendolla, G. H., & Wright, R. A. (2016). Three decades of research on motivational intensity theory: What we have learned about effort and what we still don't know. In *Advances in motivation science* (Vol. 3, pp. 149-186). Elsevier.

Richter, M., Friedrich, A., & Gendolla, G. H. (2008). Task difficulty effects on cardiac activity. *Psyc hophysiology*, *45*(5), 869-875.

Sauseng, P., Griesmayr, B., Freunberger, R., & Klimesch, W. (2010). Control mechanisms in working memory: a possible function of EEG theta oscillations. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *34*(7), 1015-1022.

Scheeringa, R., Petersson, K. M., Oostenveld, R., Norris, D. G., Hagoort, P., & Bastiaansen, M. C. (2009). Trial-by-trial coupling between EEG and BOLD identifies networks related to alpha and theta EEG power increases during working memory maintenance. *Neuroimage*, *44*(3), 1224-1238.

Shackman, A. J., Salomons, T. V., Slagter, H. A., Fox, A. S., Winter, J. J., & Davidson, R. J. (2011). The integration of negative affect, pain and cognitive control in the cingulate cortex. *Nature Reviews Neuroscience*, *12*(3), 154-167.

Shelepin, Y. E., Fokin, V. A., Harauzov, A. K., Pronin, S. V., & Chikhman, V. N. (2009, December). Location of the decision-making centre during image shape perception. In *Doklady Biological Sciences* (Vol. 429, No. 1, p. 511). *Springer Nature BV*.

Shenhav, A., Musslick, S., Lieder, F., Kool, W., Griffiths, T. L., Cohen, J. D., & Botvinick, M. M. (2017). Toward a rational and mechanistic account of mental effort. *Annual review of neuroscience*, *40*, 99-124.

Shenhav, A., Botvinick, M. M., & Cohen, J. D. (2013). The expected value of control: an integrative theory of anterior cingulate cortex function. *Neuron*, *79*(2), 217-240.

Shenhav, A., Cohen, J. D., & Botvinick, M. M. (2016). Dorsal anterior cingulate cortex and the value of control. *Nature neuroscience*, *19*(10), 1286-1291.

Siegel, M., Donner, T. H., & Engel, A. K. (2012). Spectral fingerprints of large-scale neuronal interactions. *Nature Reviews Neuroscience*, *13*(2), 121-134.

Silvestrini, N. (2017). Psychological and neural mechanisms associated with effort-related cardiovascular reactivity and cognitive control: An integrative approach. *International Journal of Psychophysiology*, *119*, 11-18.

Silvestrini, N., & Gendolla, G. H. (2019). Affect and cognitive control: Insights from research on effort mobilization. *International Journal of Psychophysiology*, *143*, 116-125.

Smith, T. W., Baldwin, M., & Christensen, A. J. (1990). Interpersonal influence as active coping: Effects of task difficulty on cardiovascular reactivity. *Psychophysiology*, *27*(4), 429-437.

Sternberg, S. (1966). High-speed scanning in human memory. *science*, *153*(3736), 652-654.

Stipacek, A., Grabner, R. H., Neuper, C., Fink, A., & Neubauer, A. C. (2003). Sensitivity of human EEG alpha band desynchronization to different working memory components and increasing levels of memory load. *Neuroscience letters*, *353*(3), 193-196.

van den Berg, B., Krebs, R. M., Lorist, M. M., & Woldorff, M. G. (2014). Utilization of reward-prospect enhances preparatory attention and reduces stimulus conflict. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, *14*(2), 561-577.

Vogt, F., Klimesch, W., & Doppelmayr, M. (1998). High-frequency components in the alpha band and memory performance. *Journal of Clinical Neurophysiology*, *15*(2), 167-172.

Wianda, E., & Ross, B. (2019). The roles of alpha oscillation in working memory retention. *Brain and behavior*, *9*(4), e01263.

Wright, R. A. (1996). Brehm's theory of motivation as a model of effort and cardiovascular response.

Wright, R. A., Killebrew, K., & Pimpalapure, D. (2002). Cardiovascular incentive effects where a challenge is unfixed: Demonstrations involving social evaluation, evaluator status, and monetary reward. *Psychophysiology*, *39*(2), 188-197.

Wright, R. A., Shaw, L. L., & Jones, C. R. (1990). Task demand and cardiovascular response magnitude: Further evidence of the mediating role of success importance. *Journal of Personality and Social Psychology*, *59*(6), 1250.

Yordanova, J., Kolev, V., & Polich, J. (2001). P300 and alpha event-related desynchronization (ERD). *Psychophysiology*, *38*(1), 143-152.

Zakrzewska, M. Z., & Brzezicka, A. (2014). Working memory capacity as a moderator of load-related frontal midline theta variability in Sternberg task. *Frontiers in human neuroscience*, *8*, 399.

Поступила в редакцию: 05.04.2022
Поступила после рецензирования: 18.05.2022
Принята к публикации: 21.05.2022

Заявленный вклад авторов

Наталия Александровна Жожикашвили – идея, руководство, анализ литературы, написание текста статьи.

Анна Денисовна Бакумова – участие в обсуждениях, анализ литературы, написание текста статьи.

Бочковская Ирина Александровна – участие в обсуждениях, анализ литературы, написание текста статьи.

Информация об авторах

Наталия Александровна Жожикашвили – стажер-исследователь, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, Российская Федерация; Researcher ID: ABI-2353-2020 Scopus Author ID: 57194142568, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8405-8722; e-mail: nzhozhik@gmail.com

Анна Денисовна Бакумова – стажер, Психологический институт Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5346-785X; e-mail: bakumovaanna@gmail.com

Бочковская Ирина Александровна – старший научный сотрудник факультета психологии, кандидат психологических наук, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.