

Негативность, связанная с ошибкой, как нейрофизиологический коррелят исполнительных функций: Обзор исследований

Мачнев Е.Г.

Научно-технологический университет «Сириус» (АНОО ВО «Университет “Сириус”»),
пгт. Сириус, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3881-6029>, e-mail: machnev.eg@talantiuspeh.ru

Таланцева О.И.

Научно-технологический университет «Сириус» (АНОО ВО «Университет “Сириус”»),
пгт. Сириус, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7555-1216>, e-mail: talantseva.oi@talantiuspeh.ru

Момотенко Д.

Научно-технологический университет «Сириус» (АНОО ВО «Университет “Сириус”»),
пгт. Сириус, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2544-5420>, e-mail: daryatomotenko@gmail.com

Исполнительные функции представляют семейство высокоуровневых когнитивных процессов, отвечающих за регуляцию человеческого поведения и познания, а также необходимых для адаптивного и целенаправленного поведения. В качестве условия, предшествующего усилению или активации исполнительного контроля можно рассмотреть процесс мониторинга ошибок, нейрональным коррелятом которого является вызванный потенциал — негативность, связанная с ошибкой (Error-Related Negativity; ERN). В данной статье представлен обзор зарубежных исследований, посвященных изучению когнитивных и аффективных аспектов процесса мониторинга ошибок в контексте исполнительных функций с использованием ERN. Было обнаружено, что исследования аффективной составляющей характеризуются многообразием подходов к воздействию на состояние участников, а также по-разному контролируют результат воздействия. В большинстве работ учитывалась информация о состоянии участников или аффективно значимые аспекты восприятия стимулов, однако этого может быть недостаточно для установления связи с реакцией на конфликт, вызванный ошибкой в экспериментальной задаче. Предположительно, общее эмоциональное состояние оказывает лишь опосредованное влияние на процесс мониторинга ошибок, что может являться причиной противоречивых результатов, наблюдаемых в данной области исследований.

Ключевые слова: исполнительные функции; эмоции; мониторинг ошибок; тормозный контроль; рабочая память; когнитивная гибкость; негативность, связанная с ошибкой; вызванный потенциал; ЭЭГ; ERN.

Финансирование. Работа написана при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-10-2021-093; Проект COG-RND-2104).

Для цитаты: Мачнев Е.Г., Таланцева О.И., Момотенко Д. Негативность, связанная с ошибкой, как нейрофизиологический коррелят исполнительных функций: Обзор исследований [Электронный ресурс] // Современная зарубежная психология. 2024. Том 13. № 2. С. 22—32. DOI: <https://doi.org/10.17759/jmfp.2024130202>

Error-Related Negativity (ERN) as a Neural Correlate of Executive Functions: A Narrative Review

Evgeniy G. Machnev

Scientific Center for Cognitive Research, Sirius University of Science and Technology, Sirius, Krasnodar region, Russia
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3881-6029>, e-mail: machnev.eg@talantiuspeh.ru

Oksana I. Talantseva

Scientific Center for Cognitive Research, Sirius University of Science and Technology, Sirius, Krasnodar region, Russia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7555-1216>, e-mail: talantseva.oi@talantiuspeh.ru

Darya Momotenko

Scientific Center for Cognitive Research, Sirius University of Science and Technology, Sirius, Krasnodar region, Russia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2544-5420>, e-mail: daryamomotenko@gmail.com

Executive functions are a set of high-level cognitive processes that regulate human behavior and cognition, and are necessary for adaptive and goal-directed behavior. The error monitoring process can be considered as a condition preceding the enhancement or activation of executive control. The neural correlate of this condition is the error-related negativity (ERN). This article presents a narrative review of research investigating cognitive and affective aspects of the error monitoring process in the context of executive functions using the ERN. The literature review on the affective aspect revealed a diversity of approaches to influencing the state of participants. Most works take into account information about participants' state or affectively salient aspects of stimuli perception. However, this information may not be sufficient to establish a link to the response to conflict induced by an error in an experimental task. Presumably, the general emotional state has only an indirect influence on the error monitoring process. This may be the reason for the inconsistent results observed in this area of research.

Keywords: executive functions, emotion, error monitoring, inhibitory control, working memory, cognitive flexibility, error-related negativity, evoked potential, EEG, ERN.

Funding. Supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement 075-10-2021-093, Project COG-RND-2104).

For citation: Machnev E.G., Talantseva O.I., Momotenko D. Error-Related Negativity (ERN) as a Neural Correlate of Executive Functions: A Narrative Review. *Sovremennaya zarubezhnaya psikhologiya = Journal of Modern Foreign Psychology*, 2024. Vol. 13, no. 2, pp. 22—32. DOI: <https://doi.org/10.17759/jmfp.2024130202> (In Russ.).

Введение

Исполнительные функции (ИФ) относятся к семейству нисходящих высокоуровневых когнитивных процессов, отвечающих за регуляцию человеческого поведения и познания. ИФ представляют сложный набор способностей, которые задействуются при постановке и достижении целей и в тех случаях, когда автоматизированные или импульсивные действия невозможны или же неэффективны [6; 7; 8]. Многочисленные исследования показывают, что ИФ играют важную и необходимую роль в адаптации и регуляции поведения, психическом благополучии, когнитивном, социальном, эмоциональном и психологическом развитии [7], а дефициты ИФ ассоциированы со множеством нарушений развития и психических расстройств [13].

Традиционно, принято выделять три основные ИФ: 1) тормозный контроль — способность регулировать поведение, эмоции, мысли и внимание в условиях, когда требуется преодолеть сильное побуждение действовать определенным образом, вместо этого совершая более уместные или необходимые действия; 2) рабочая память — удержание и внутренняя работа с

информацией, которая в этот момент не представлена в восприятии; 3) когнитивная гибкость — способность переключаться между задачами, рассматривать что-либо с разных точек зрения, адаптироваться к изменениям [7; 8].

Один из принципов организации ИФ, согласно Дж. Уорду [28], заключается в выделении контроля аффективных (горячие ИФ) и когнитивных (холодные ИФ) стимулов. Горячие ИФ включают обработку информации, связанной с вознаграждением, эмоциями и мотивацией, тогда как холодные ИФ включают когнитивную обработку информации. Считается, что данный подход позволяет рассматривать ИФ подобно спектру, отражающему то, что их компоненты могут быть горячими или холодными в зависимости от контекста [13].

В качестве условия активации ИФ выделяют неэффективность автоматизированных действий. Исходя из этого, процесс мониторинга ошибок можно связать с оценкой необходимости в осуществлении или усилении контроля [25]. Считается, что обнаружение ошибок является одной из функций дорсальной области передней поясной извилины; активность в данной области также связывают с оценкой степени кон-

фликтности ответа. Одним из нейрональных коррелятов процесса мониторинга ошибок является негативность, связанная с ошибкой (Error-Related Negativity, ERN). ERN — это отрицательный, связанный с событием потенциал, регистрируемый во фронтальных и центральных отведениях по сагиттальной линии, амплитуда которого достигает пика приблизительно через 100 мс [25; 28]. Согласно теории мониторинга конфликтов, конфликт возникает после совершения ошибки, когда продолжающаяся обработка стимула приводит к активации правильного ответа, противоречащего инициированному или завершенному действию. Компонент ERN повторяет ключевые свойства сигнала, отражающего степень конфликтности, такие как изменение амплитуды в зависимости от дифференцируемости вариантов ответа или от акцента на скорости или точности при выполнении задачи [30].

Значимую роль в процессе мониторинга ошибок играет степень неопределенности. Неуверенность в правильности ответа может приводить к тому, что ошибочные и правильные ответы будут иметь схожую реакцию на нейрональном уровне. Исходя из этого, субъективное восприятие индивида в данном контексте оказывается важнее объективных показателей деятельности. Степень неопределенности может отличаться и в зависимости от специфики задач. Так, в условиях, когда необходимая для принятия решения информация содержится в предъявленном стимуле (например, задача с фланкерами), ошибки распознаются легче и имеют более выраженную амплитуду в сравнении с условием, где при выборе ответа нужно актуализировать предъявленную ранее подсказку [21].

Ранние исследования мониторинга конфликтов были частично основаны на предположении о том, что передняя поясная кора отвечает скорее за когнитивную обработку информации, однако в более поздних исследованиях была обнаружена связь активности в данной области и с аффективно-значимыми стимулами [28]. Это согласуется с тем, что амплитуда ERN чувствительна к мотивационным, личностным и эмоциональным факторам. В частности, было показано, что на компонент могут влиять такие черты, как тревожность, беспокойство, нейротизм и чувствительность к наказанию [1].

Таким образом, с учетом значительного количества факторов, влияющих на различия в ERN, цель данной статьи заключается в проведении всестороннего обзора исследований, позволяющих рассмотреть как когнитивные, так и аффективные аспекты мониторинга ошибок в контексте ИФ.

Поиск литературы для целей данного обзора осуществлялся по базе исследований, которая предварительно была сформирована в соответствии с методологией систематического поиска (см. Приложение). В рамках данной статьи мы прежде всего фокусировались на обзоре наиболее поздних исследований и не рассматривали исследования, оценивающие нейрокорреляты ИФ в клинических популяциях.

Результаты исследований и обсуждение

Аффективная составляющая в исследованиях компонента ERN

Основная группа найденных нами работ относится к изучению роли аффективной составляющей в процессе мониторинга ошибок. В контексте ИФ, обработке информации, связанной с эмоциями и мотивацией, относят к горячим ИФ. Они особенно важны в условиях высокой эмоциональной или мотивационной значимости.

В целом, выявленные нами исследования можно разделить на две подгруппы, в первой воздействие на аффективную составляющую осуществлялась в рамках экспериментальных условий, во второй рассматривались индивидуальные характеристики участников. При описании результатов мы преимущественно сосредоточимся на дизайнах исследований, более подробно рассматривая операционализацию аффективной составляющей.

Ситуативный учет аффективного компонента

Для изучения аффективных процессов некоторые исследователи модифицируют лабораторные парадигмы, включая в них аффективно-значимые стимулы, и/или осуществляют более прямое воздействие на эмоциональное состояние с последующим контролем эффективности манипуляции. Например, в одном из исследований [20] участники просматривали позитивные или нейтральные видеоролики перед выполнением блока задач с фланкерами. Эффективность воздействия была подтверждена анализом субъективных оценок видеоклипов, усилением электромиографической активности скуловой мышцы и электрической активности кожи, показателем возбуждения на физиологическом уровне. Амплитуда ERN была выше после позитивных видеороликов, тогда как время реакции и количество ошибок значимо не различались. Хотя модуляция позитивного настроения перед блоком задач повышала чувствительность к ошибкам, более детальный анализ не выявил значимых корреляций между субъективными оценками, физиологическими показателями и амплитудой ERN, что, вероятно, по замечанию авторов исследования, могло быть связано с тем, что аффективное разнообразие значительно шире, чем шкала между позитивным и негативным.

Значимое влияние еще одного аспекта эмоциональных состояний наблюдалось в исследовании [3], где участники оценивали предъявляемые ранее изображения по валентности и эмоциональному возбуждению. Группам испытуемых демонстрировались изображения либо перед выполнением задания с фланкерами, либо во время его выполнения. Была дана инструкция сосредоточиться на задании и игнорировать изображения. В условии с последовательным предъявлением, изображения с высокими оценками по возбуждающему эффекту были связаны с большей амплитудой ERN, однако при одновременном предъявлении эта связь не

сохранилась. Напротив, положительная валентность была связана со сниженной амплитудой при одновременном предъявлении, но в условии с последовательным предъявлением связь не обнаружилась. Полученные результаты подчеркивают неоднозначность влияния аффективной составляющей на процесс мониторинга ошибок, а также важность учета контекстных особенностей воздействия на эмоциональное состояние в совокупности с учетом нескольких аспектов состояния.

Более персонализированный способ модуляции эмоционального состояния использовался в исследовании К. Пауль и соавторов [19]. Участникам предлагалось визуализировать приятные воспоминания о недавних событиях, а в качестве нейтрального условия использовались воспоминания о физической активности. Данная процедура выполнялась перед каждым блоком парадигмы Go/No-Go. Эффективность воздействия была подтверждена анализом персональной обратной связи, однако значимых различий в амплитуде ERN (как и по показателям электрической активности кожи) выявлено не было.

Результаты данного исследования поднимают вопрос о влиянии на мониторинг ошибок степени связи переживаемых эмоций непосредственно с выполняемой задачей. Можно предположить, что степень данной связи оказывает значимое влияние на процесс мониторинга ошибок. В рассмотренном же исследовании вызванные эмоции были связаны скорее с актуализированными событиями, чем с экспериментальной задачей. Данное предположение можно подкрепить результатами исследования [9], в котором воздействие осуществлялось с использованием парадигмы регуляции эмоций, способствующей когнитивной переоценке эмоционального состояния в процессе выполнения экспериментальной задачи. Перед выполнением блока задач парадигмы Go/No-Go давалась инструкция, нацеленная либо на отстраненное отношение к заданию (снижение степени регуляции эмоций), либо на вовлеченное. В контрольном условии участников просили выполнять задание естественным образом. Анализ обратной связи подтвердил эффективность манипуляции. В условии с отстраненным отношением к заданию амплитуды ERN и ERN (рассчитывается как разность волны между правильными и ошибочными ответами) были менее выражены и в меньшей степени различались между ошибочными и правильными ответами по сравнению с другими условиями. Кроме этого, переоценка состояния влияла и на реализацию тормозного контроля (частота ошибок); так, в условии с отстраненным отношением задача выполнялась хуже. Манипуляция через отношение к задаче вероятнее всего оказывала влияние и на воспринимаемую значимость конфликтов при совершении ошибок, что находило отражение в амплитуде ERN.

В следующем исследовании воздействие на эмоциональное состояние осуществлялось посредством предъявления обратной связи в ходе эксперимента [22].

Участникам подавался звуковой сигнал средней или высокой громкости в качестве наказания за ошибку с последующим сбором обратной связи о состоянии участников. Проверка эффективности воздействия показала, что самооценки в блоках с наказанием были выше по тревоге, прилагаемым усилиям, фрустрации и безнадежности и ниже по скуке. Было обнаружено, что типы чувств, переживаемых во время выполнения задания, по-разному связаны с поведенческими показателями деятельности, включая изменения в осторожности реагирования и тормозном контроле. Однако не было обнаружено значимой связи между показателями самоотчета и амплитудой ERN. После исключения данных самоотчета из многоуровневой линейной модели эффект наказания был значим и заключался в более выраженной амплитуде в блоках с наказанием. Полученный результат можно интерпретировать как более выраженную реакцию на несоответствие между выполняемым действием и обнаруженным ответом, обусловленную нежелательными последствиями ошибки.

Влияние социального контекста на аффективный компонент было затронуто в работе Т. Сузуки и соавторов [11]. В дополнение к классической версии задачи с фланкерами, участники выполняли модифицированное задание с использованием аффективно окрашенных (нейтральные, приятные и неприятные изображения) и социально значимых стимулов (лица с нейтральным выражением). Проверки эффективности воздействия на эмоциональное состояние не проводилось. Амплитуда ERN была более выражена в задачах с аффективными стимулами, как с положительной, так и с отрицательной валентностью. Из этого следует, что совершение ошибок в аффективном контексте вызвало более сильные нейрональные реакции, чем совершение ошибок в нейтральном или социально нейтральном контексте.

Учет индивидуальных характеристик, связанных с аффективным компонентом

К данной категории исследований нами были отнесены работы, в которых учитывались индивидуальные характеристики, связанные с аффективной составляющей процесса мониторинга ошибок.

Одним из направлений этого типа работ, является изучение связи алекситимии с мониторингом ошибок. Так, в одном из исследований [10], основанном на парадигме Струпа с классификацией лиц по эмоциональным выражениям, у участников с низким уровнем алекситимии наблюдалась более высокая амплитуда ERN при выполнении задачи с эмоциональными выражениями по сравнению с контрольным условием. В группе с высоким уровнем алекситимии не было обнаружено значимых различий. Помимо этого, разница в амплитуде ERN между эмоциональным и нейтральным условиями отрицательно коррелировала с трудностью в идентификации собственных чувств. Результаты данного исследования подтверждают положение о том, что если испытуемый не может сформировать представление о

верном варианте ответа, то и конфликт будет менее выражен, что находит свое отражение в амплитуде компонента. При этом дизайн исследования позволяет заключить, что причиной могут являться индивидуальные особенности испытуемых.

Еще одним важным аспектом — влияние на процесс мониторинга ошибок навыков совладания с эмоциями. Так, в исследовании Р. Овермайера и соавторов [26] проводилась оценка самоконтроля в условиях повседневной деятельности. На протяжении недели участники многократно заполняли форму самоотчета с вопросами о возникновении желания совершить какое-либо действие, силе и степени конфликтности желания, попытке ему противостоять, а также было ли желание реализовано. Неудачи в самоконтроле рассчитывались как сумма реализаций конфликтных желаний по отношению ко всем заполненным формам. ERN регистрировался в классической задаче с фланкерами. Регрессионный анализ показал, что более выраженная амплитуда компонента предсказывает меньшее число неудачных попыток самоконтроля, что, в свою очередь, указывает на более высокий уровень самоконтроля.

Также в одной из работ [12] изучалось влияние подавления эмоций во время просмотра отрывка фильма в зависимости от показателей опросника «Ценности эмоционального контроля» (Emotion Control Values; ECV). У группы с низкими баллами по ECV было обнаружено уменьшение амплитуды ERN и ERN в условии подавления эмоций по сравнению с контрольной группой, тогда как у группы с высокими показателями ECV не было значимых изменений в амплитуде. На основе этого авторы приходят к выводу о том, что подавление эмоций не обязательно приводит к истощению, а зависит от эффективности эмоциональной регуляции.

Данный блок представлен сравнительно небольшим количеством исследований, однако их результаты свидетельствуют о влиянии показателей самоконтроля, эмоциональной регуляции и алекситимии на амплитуду ERN, что подтверждает вклад индивидуальных характеристик в процесс мониторинга ошибок и позволяет рассмотреть результаты данных в контексте принципа организации ИФ.

Вклад аффективного компонента в процесс мониторинга ошибок

Рассмотренные работы отличаются многообразием подходов к тому, как оказывалось и контролировалось воздействие на состояние участников, что является вероятной причиной несколько противоречивых результатов. В зависимости от экспериментального дизайна в положительном контексте наблюдалось увеличение амплитуды ERN [11; 20], снижение [3] или же отсутствие эффекта в сравнении с контрольным условием [19]. В отрицательном контексте амплитуда была более выражена при использовании аффективно окрашенных стимулов [11] и в условии с наказанием за ошибку [22]. Вовлеченность в выполняемую задачу

была связана с увеличением амплитуды, тогда как при отстраненном отношении амплитуда была менее выражена и слабо отличалась от нейрональной реакции на правильные действия [9].

Учитывая многообразие подходов, в большинстве работ были обнаружены значимые изменения в амплитуде ERN. Исключение составило исследование с использованием визуализации приятных воспоминаний [19]. Несмотря на персонализированный подход и подтверждение эффективности воздействия анализом самоотчетов, отсутствие различий могло быть обусловлено низкой связью эмоций с выполняемым заданием. Актуализированные переживания были скорее связаны с событиями из жизни участников, чем с экспериментальной задачей. Кроме этого, не было обнаружено различий и в физиологическом показателе возбуждения, когда в другом исследовании [20] он подтверждал эффективность воздействия.

Логично выдвинуть предположение, что при изучении влияния аффективной составляющей на процесс мониторинга ошибок важно учитывать степень связи переживаемых эмоций непосредственно с выполняемой деятельностью. Процесс мониторинга ошибок отражает реакцию на конфликт между инициированным или совершенным действием и информацией о том, какое действие было бы верным. С этой точки зрения, вероятно, недостаточно учитывать состояние участника или аффективные аспекты восприятия стимулов (факторы, которые контролировались в большинстве исследований), поскольку этого может быть недостаточно для установления дополнительной связи с реакцией на конфликт, вызванный ошибкой в экспериментальной задаче.

Среди рассмотренных работ можно выделить эксперименты, в которых осуществлялось более контекстное воздействие на состояние участников, например, посредством переоценки отношения к самой задаче [9]. Результаты, полученные с использованием такого подхода, подчеркивают важность реакции непосредственно на конфликт при воздействии на отношение к задаче в которой он может возникнуть. Так, при отстраненном отношении ERN был менее выражен, а нейрональная реакция на ошибочные и правильные ответы в меньшей степени различалась по сравнению с другими условиями.

Исходя из этого, можно сформулировать вывод о том, что общее эмоциональное состояние оказывает лишь косвенное влияние на отношение к заданию и, следовательно, на обработку возникающих в процессе его выполнения ошибок. Данный фактор крайне редко контролируется в рассмотренных исследованиях, что отчасти может объяснять неоднородность результатов.

Исследования мониторинга ошибок в контексте организации исполнительных функций

Изучение роли аффективной составляющей в процессе мониторинга ошибок, рассматриваемого в качестве условия активации или усиления ИФ, может

иметь ценность в контексте обсуждения принципа организации ИФ.

По мнению М. Салехинеджад и соавторов [13], наименее спорный подход заключается в том, чтобы различать ИФ на основе степени их связи с эмоциональными или чисто когнитивными аспектами. В качестве достоинств такого подхода авторы отмечают, что он позволяет рассматривать компоненты ИФ подобно спектру между когнитивным и эмоциональным в зависимости от контекстной информации. При этом под контекстной информацией вероятнее всего подразумеваются условия, в которых осуществляется исполнительный контроль. Так, при описании подхода М. Салехинеджад и соавторы ссылаются на работу Дж. Уорда [28], в которой этот же принцип раскрывается как различие между контролем аффективных стимулов и контролем чисто когнитивных стимулов.

Однако рассматриваемый принцип организации ИФ не объясняет результаты исследований [10; 12; 26], где выполняя одинаковые экспериментальные задачи (находясь в схожих условиях, выполняя экспериментальную задачу с идентичными стимулами) у участников регистрировались различия в нейрональном показателе мониторинга ошибок в зависимости от уровня самоконтроля, эффективности эмоциональной регуляции и уровня алекситимии. Таким образом, более константные индивидуальные характеристики также оказывают значимое влияние на процессы исполнительного контроля, как минимум, на условие их активации. Обсуждаемая организация ИФ обуславливается не только внешним контекстом, но и индивидуальными особенностями, связанными с его восприятием. В данной формулировке восприятие внешнего контекста можно соотнести со степенью активации аффективной составляющей, которая в значительной степени будет зависима от индивидуальных особенностей человека. В свою очередь, самоконтроль, выделяемый А. Даймонд [7; 8] в качестве компонента тормозного контроля, можно связать с контролем над эмоциями в контексте выполняемой деятельности.

Стоит отметить, что результаты исследований с аффективной составляющей получены в экспериментальных задачах, направленных преимущественно на оценку тормозного контроля, что несколько затрудняет генерализацию выдвинутых предположений на другие домены ИФ.

Когнитивная составляющая в исследованиях компонента ERN

Вторую группу найденных работ можно отнести к изучению роли когнитивных аспектов в процессе мониторинга ошибок. В контексте ИФ данные исследования можно сопоставить с холодными ИФ, охватывающими когнитивные процессы, основанные на логике. К ним можно отнести планирование, рабочую память, торможение реакции, контроль внимания и когнитивную гибкость, при условии, что данные процессы представлены в эмоционально-нейтральном контексте [13].

В обнаруженных нами исследованиях изучалась связь рабочей памяти, внимания и переключения между задачами с процессом мониторинга ошибок.

Наибольшая часть работ данного блока была посвящена изучению рабочей памяти. В нескольких исследованиях сопоставлялись группы, разделенные по индивидуальным различиям в объеме рабочей памяти. Было показано, что в группах с высокими показателями наблюдается более выраженная амплитуда ERN [4; 18]. В данных исследованиях участники решали простые математические задания, запоминая букву, предъявляемую после каждой задачи. После каждых трех—семи серий задач требовалось воспроизводить верную последовательность букв. Далее группы формировались из проходившей тестирование выборки на основе наиболее высоких или низких результатов. Авторы предполагают, что люди с высокими оценками объема рабочей памяти имеют более развитое внимание [18], вследствие чего более эффективно отслеживают потенциальные ошибки.

В исследовании М. Майера и М. Штайнхаузера [16] изучалась нагрузка на рабочую память в зависимости от категории ошибок. К первой категории были отнесены ошибки, вызванные дистрактором, а ко второй — более грубые, не связанные с вероятными вариантами ответа. К примеру, если вариант задания содержал два цвета, один из которых был дистрактором, а другой таргетом, участник в качестве ответа выбирал третий цвет, который не был представлен. При низкой нагрузке на рабочую память вероятность ошибок первого типа была выше, чем вероятность ошибок второго типа. Также амплитуда ERN была выше для ошибок первого типа при низкой нагрузке, но подобного эффекта не наблюдалось при высокой нагрузке. Сходные амплитуды ERN для двух типов ошибок при высокой нагрузке могут быть интерпретированы как свидетельство того, что нагрузка на рабочую память нарушает процесс оценки конфликта, вызванного ошибкой.

Однако в более новом исследовании [27] не удалось получить свидетельств в пользу гипотезы о связи ERN с нагрузкой на рабочую память. Участникам было предложено запоминать последовательность из двух (низкая нагрузка) или пяти букв (высокая нагрузка) на протяжении блока задач с фланкерами. Предположительно, отсутствие результатов может быть связано с операционализацией нагрузки. В работе М. Майера и М. Штайнхаузера [16] был реализован подход, при котором участникам требовалось запомнить набор из шести одинаковых чисел при низкой нагрузке или случайную комбинацию из шести разных чисел при высокой. Вероятно, такой подход в совокупности с учетом различных типов ошибок позволил выявить связь.

Объем визуальной рабочей памяти был изучен в работе М. Уивера и коллег [29] с использованием регистрации глазодвигательной активности. От участников требовалось быстро направить взгляд на целевой сти-

мул при наличии отвлекающего, который был либо более, либо менее заметным. Соотношение степени заметности варьировалось таким образом, что для выполнения задачи требовалась разная степень контроля. Участники с высокими результатами тестирования визуальной рабочей памяти показали раннее начало и, в условии более заметных отвлекающих стимулов, большую ERN. Амплитуда компонента была более выражена, когда отвлекающий стимул был заметнее целевого по сравнению с условием, когда более заметен был целевой стимул. Таким образом, условие с более заметным дистрактором усиливало конфликт между нисходящим контролем и низкоуровневыми процессами, что согласовывается с изменениями в амплитуде ERN.

Важно отметить, что в рассмотренных исследованиях рабочая память операционализована скорее в соответствии с многокомпонентной моделью А. Бэддели [2]. Однако А. Даймонд [7] в концепции ИФ предлагает понимать под рабочей памятью удержание не представленной в восприятии информации и операции с ней, тогда как модель Бэддели дополнительно охватывает тормозный контроль и когнитивную гибкость.

Согласно А. Бэддели [2], управление рабочей памятью осуществляется центральным исполнительным органом через направление внимания на задачу или его распределение между двумя и более задачами. На тесную связь избирательного внимания с рабочей памятью также указывает А. Даймонд [7].

При переходе к рассмотрению роли внимания в процессе мониторинга ошибок было продемонстрировано быстрое и гибкое взаимодействие между реакцией на ошибку и избирательным вниманием на нейронном уровне [23]. Корректировка внимания происходила одновременно с ERN и была связана с амплитудой компонента. На основе эмпирических результатов была предложена модель, согласно которой недостаток избирательного внимания к релевантным стимулам приводит к возникновению ошибки, реакция на которую отражается в ERN, что вызывает незамедлительную перестройку процессов внимания и влияет на последующую производительность. Таким образом предполагается, что корректировка внимания после ошибки отражает механизм установления оптимального уровня избирательности внимания.

В другой работе изучалось влияние устойчивости внимания на мониторинг ошибок [24]. Было показано, что увеличение уровня когнитивной усталости вызывало снижение устойчивости внимания, что в совокупности связано со снижением ERN. Оценка взаимосвязи между показателями опросника усталости и ERN показала, что повышенная сонливость и утомляемость связаны со снижением амплитуды.

Было найдено несколько работ, изучающих процесс мониторинга ошибок при переключении между задачами. В контексте ИФ эти работы можно отнести к когнитивной гибкости, поскольку помимо прочего

она охватывает скорость и гибкость адаптации к изменениям [7; 8].

Затраты на переключение между задачами обычно определяются как задержка в реакции после переключения, которую связывают либо с адаптацией к условиям новой задачи, либо с помехами от предыдущих условий. Было показано, что при переключении между задачами возникает особый тип ошибок, связанных именно с замешательством в задании [14]. При анализе ошибок данного типа было обнаружено снижение амплитуды ERN после переключения между задачами, что может быть связано с менее определенными представлениями о верном варианте ответа в новых условиях.

Как пишут Р. Штайнхаузер и соавторы [5], способность гибко адаптироваться к меняющимся требованиям задачи требует сложной работы системы мониторинга, результат которой используется для регулирования целенаправленного поведения. Моделируя процесс быстрого переключения между задачами, данной группой авторов исследовалось влияние мониторинга эффектов действия в одной задаче (добавление фрагмента к стимулу сверху или снизу) на мониторинг ошибок в последующем задании (задача с цветными фланкерами). Было обнаружено, что неожиданный эффект в ответ на действие в первой задаче (фрагмент добавляется противоположно выбранному варианту) увеличивает время ответа в последующей. После неожиданного эффекта также наблюдалась более выраженная амплитуда ERN. Авторы приходят к выводу, что обе системы мониторинга опираются на общую систему, связанную с обнаружением новизны. Таким образом, неожиданный эффект действия также можно рассмотреть как конфликт, вызванный несоответствием ожидаемому эффекту, что в целом может повысить неопределенность и сделать вызванный ошибкой последующий конфликт более значимым.

Подводя итог, в процессе мониторинга ошибок несомненную роль играют внешние требования к когнитивным способностям человека, обусловленные выполняемой задачей, но также и индивидуальный уровень развития когнитивных способностей. Предположительно, в качестве когнитивных факторов, влияющих на обработку вызванного ошибкой конфликта, можно отметить степень соответствия требований задачи возможностям человека. Так, люди с более высокими результатами тестирования на рабочую память демонстрировали более выраженную нейронную реакцию на ошибку [4; 18; 29]. Значительную роль также должна играть способность формировать однозначное представление о верном варианте ответа [14] и устойчивость данной способности. К примеру, нагрузка на когнитивные ресурсы отрицательно сказывалась на процессе мониторинга ошибок [16; 24].

Поскольку ERN оценивается в условиях с ограниченным временем на выбор ответа, то в данном контексте важную роль играет степень влияния низкоуровневых процессов на принятие решения [29], например, импульсивность.

Выводы

В данной работе представлен обзор исследований, изучающих когнитивные и аффективные аспекты процесса мониторинга ошибок с использованием его нейронального коррелята — негативности, связанной с ошибкой.

Исследования аффективной составляющей мониторинга ошибок отличались многообразием подходов к воздействию на состояние участников, что является вероятной причиной несколько противоречивых результатов. В большинстве исследований учитывалось состояние участника или аффективно значимые аспекты восприятия стимулов, однако этого может быть недостаточно для установления связи с реакцией на конфликт, вызванный ошибкой в экспериментальной задаче. Вероятно, общее эмоциональное состояние оказывает лишь опосредованное влияние на процесс мониторинга ошибок.

В процессе мониторинга ошибок играют роль внешние требования к когнитивным способностям человека, обусловленные выполняемой задачей, а также индивидуальный уровень развития когнитивных способностей. Так, в рассмотренных исследованиях изучалась связь рабочей памяти, когнитивной усталости и нагрузки на рабочую память, внимания и переключения между задачами с процессом мониторинга ошибок.

Разделение ИФ на горячие и холодные в зависимости от контекстной информации не объясняет результаты исследований, в которых наблюдалось изменение амплитуды ERN при условии, что участники выполняли идентичную экспериментальную задачу, иными словами, находились в схожем контексте. Выявленные различия были связаны с индивидуальными особенностями участников, из чего следует, что разделение ИФ на горячие и холодные может обуславливаться не только внешним контекстом, но и индивидуальными особенностями, связанными с его восприятием.

В качестве ограничений данного обзора можно отметить неполный охват найденных исследований, а также достаточно узко сформулированный поисковый запрос. Настоящий обзор может быть полезен при изучении аффективных и когнитивных аспектов процесса мониторинга ошибок, а также при планировании исследований, направленных на выяснение связи между горячими и холодными ИФ. Проведение экспериментов в условиях с высокой экологической валидностью [15] может внести значительный вклад в понимание рассматриваемых феноменов и их взаимосвязей. Несмотря на потенциальные сложности в реализации такого подхода, ERN наблюдается в сложных и динамичных условиях [17].

Приложение

Для поиска литературы по исследованиям, оценивающим взаимосвязь между исполнительными функциями и ERN нами был проведен систематический поиск литературы (22.01.2024) без нижнего ограничения по дате по следующей методологии:

Базы данных: Scopus и Web of Science.

Поисковой запрос: (ERN OR «error-related negativity» OR «error related negativity») AND («executive function*» OR «cognitive control»). Был также применен фильтр по типу статьи, учитывающий только эмпирические и обзорные, и фильтр по английскому языку.

Область поиска: заголовки, абстракты и ключевые слова.

Критерии включения:

1. Данные о взаимосвязи компонента ERN и исполнительных функций (или одной из них);
2. Публикации, основанные на эмпирических исследованиях;
3. Исследования, проведенные на не-клинических популяциях.

Критерии исключения:

1. Обзоры, систематические обзоры и мета-анализы;
2. Исследования интервенций;
3. Исследования клинических популяций;
4. Публикации на языках, отличных от английского.

Процесс идентификации и скрининга статей:

Всего нами было идентифицировано 1040 статей (413 статей по базе Scopus, 627 — по Web of Science). После удаления дубликатов при помощи платформы Nested Knowledge суммарное количество статей составило 710. После скрининга статей по заголовкам и абстрактам на предмет соответствия критериям включения, было принято 62 статьи, финальное количество релевантных работ по результатам скрининга полных текстов составило 54 статьи.

Для цели данного обзора мы сосредоточились на анализе более новых исследований, исключая предыдущие работы авторских коллективов.

Литература

1. Aversiveness of errors and the error-related negativity (ERN): A systematic review on the affective states' manipulations findings / X. Nunez-Estupinan, L.Z. Berticelli, R.M.M. de Almeida, G. Gauer // *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*. 2022. Vol. 22. № 4. P. 754—776. DOI:10.3758/s13415-022-01002-2
2. *Baddeley A.* Working memory // *Memory* / Eds. A. Baddeley, M.W. Eysenck, M.C. Anderson. London: Routledge, 2020. P. 71—111.
3. *Clayson P.E., Larson M.J.* The impact of recent and concurrent affective context on cognitive control: An ERP study of performance monitoring // *International Journal of Psychophysiology*. 2019. Vol. 143. P. 44—56. DOI:10.1016/j.ijpsycho.2019.06.007
4. *Coleman J.R., Watson J.M., Strayer D.L.* Working memory capacity and task goals modulate error-related ERPs // *Psychophysiology*. 2018. Vol. 55. № 3. Article ID e12805. 14 p. DOI:10.1111/psyp.12805
5. Common mechanisms in error monitoring and action effect monitoring / R. Steinhauser, R. Wirth, W. Kunde, M. Janczyk, M. Steinhauser // *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*. 2018. Vol. 18. P. 1159—1171. DOI:10.3758/s13415-018-0628-y
6. *Cristofori I., Cohen-Zimerman S., Grafman J.* Executive functions // *Handbook of clinical neurology* / Ser. eds. M.J. Aminoff, F. Boller, D.F. Swaab. Amsterdam: Elsevier, 2019. Vol. 163. P. 197—219. DOI:10.1016/B978-0-12-804281-6.00011-2
7. *Diamond A.* Executive functions // *Annual review of psychology*. 2013. Vol. 64. P. 135—168. DOI:10.1146/annurev-psych-113011-143750
8. *Diamond A.* Executive functions // *Handbook of clinical neurology* / Ser. eds. M.J. Aminoff, F. Boller, D.F. Swaab. Amsterdam: Elsevier, 2020. Vol. 173. P. 225—240. DOI:10.1016/B978-0-444-64150-2.00020-4
9. Emotion down-regulation diminishes cognitive control: a neurophysiological investigation / N.M. Hobson, B. Saunders, T. Al-Khindi, M. Inzlicht // *Emotion*. 2014. Vol. 14. № 6. P. 1014—1026. DOI:10.1037/a0038028
10. Error monitoring is related to processing internal affective states / M. Maier, C. Scarpazza, F. Starita, R. Filogamo, E. Lдавас // *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*. 2016. Vol. 16. P. 1050—1062. DOI:10.3758/s13415-016-0452-1
11. Error-monitoring across social and affective processing contexts / T. Suzuki, B.A. Oumeziane, K. Novak, D.B. Samuel, D. Foti // *International Journal of Psychophysiology*. 2020. Vol. 150. P. 37—49. DOI:10.1016/j.ijpsycho.2020.01.009
12. High emotion-control value reduces error-detection impairment following emotion suppression: an event-related potential study / N. Chen, J. Lu, L. Jin, X. Li // *NeuroReport*. 2017. Vol. 28. № 12. P. 760—765. DOI:10.1097/WNR.0000000000000840
13. Hot and cold executive functions in the brain: A prefrontal-cingular network / M.A. Salehinejad, E. Ghanavati, M.H.A. Rashid, M.A. Nitsche // *Brain and Neuroscience Advances*. 2021. Vol. 5. Article ID 23982128211007769. 19 p. DOI:10.1177/23982128211007769
14. *Ikeda K., Hasegawa T.* Task confusion after switching revealed by reductions of error related ERP components // *Psychophysiology*. 2012. Vol. 49. № 3. P. 427—440. DOI:10.1111/j.1469-8986.2011.01295.x
15. *Kihlstrom J.F.* Ecological validity and «ecological validity» // *Perspectives on Psychological Science*. 2021. Vol. 16. № 2. P. 466—471. DOI:10.1177/17456916209667
16. *Maier M.E., Steinhauser M.* Working memory load impairs the evaluation of behavioral errors in the medial frontal cortex // *Psychophysiology*. 2017. Vol. 54. № 10. P. 1472—1482. DOI:10.1111/psyp.12899
17. Measuring task-related brain activity with event-related potentials in dynamic task scenario with immersive virtual reality environment / M. Arake, H. Ohta, A. Tsuruhara, Y. Kobayashi, N. Shinomiya, H. Masaki, Y. Morimoto // *Frontiers in Behavioral Neuroscience*. 2022. Vol. 16. Article ID 779926. 9 p. DOI:10.3389/fnbeh.2022.779926
18. *Miller A.E., Watson J.M., Strayer D.L.* Individual differences in working memory capacity predict action monitoring and the error-related negativity // *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*. 2012. Vol. 38. № 3. P. 757—763. DOI:10.1037/a0026595
19. Modulatory effects of happy mood on performance monitoring: Insights from error-related brain potentials / K. Paul, W. Walentowska, J. Bakic, T. Dondaine, G. Pourtois // *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*. 2017. Vol. 17. P. 106—123. DOI:10.3758/s13415-016-0466-8
20. *Nigbur R., Ullsperger M.* Funny kittens: Positive mood induced via short video-clips affects error processing but not conflict control // *International Journal of Psychophysiology*. 2020. Vol. 147. P. 147—155. DOI:10.1016/j.ijpsycho.2019.11.007
21. *Pailing P.E., Segalowitz S.J.* The effects of uncertainty in error monitoring on associated ERPs // *Brain and cognition*. 2004. Vol. 56. № 2. P. 215—233. DOI:10.1016/j.bandc.2004.06.005
22. *Saunders B., Milyavskaya M., Inzlicht M.* What does cognitive control feel like? Effective and ineffective cognitive control is associated with divergent phenomenology // *Psychophysiology*. 2015. Vol. 52. № 9. P. 1205—1217. DOI:10.1111/psyp.12454
23. *Steinhauser M., Andersen S.K.* Rapid adaptive adjustments of selective attention following errors revealed by the time course of steady-state visual evoked potentials // *Neuroimage*. 2019. Vol. 186. P. 83—92. DOI:10.1016/j.neuroimage.2018.10.059
24. Sustained attention is associated with error processing impairment: evidence from mental fatigue study in four-choice reaction time task / Y. Xiao, F. Ma, Y. Lv, G. Cai, P. Teng, F. Xu, S. Chen // *PloS one*. 2015. Vol. 10. № 3. Article ID e0117837. 15 p. DOI:10.1371/journal.pone.0117837

25. The error-related negativity (ERN/Ne) / W.J. Gehring, Y. Liu, J.M. Orr, J. Carp // The Oxford handbook of event-related potential components / Eds. S.J. Luck, E.S. Kappenman. New York: Oxford University Press, 2012. P. 231—291. DOI:10.1093/oxfordhb/9780195374148.013.0120
26. The error-related negativity predicts self-control failures in daily life / R. Overmeyer, J. Berghäuser, R. Dieterich, M. Wolff, T. Goschke, T. Endrass // *Frontiers in human neuroscience*. 2021. Vol. 14. Article ID 614979. 12 p. DOI:10.3389/fnhum.2020.614979
27. To err is human-to understand error-processing is divine: Contributions of working memory and anxiety to error-related brain and pupil responses / S. LoTempio, J. Silcox, R. Murdock, D. Strayer, B. Payne // *Psychophysiology*. 2023. Vol. 60. № 12. Article ID e14392. 21 p. DOI:10.1111/psyp.14392
28. *Ward J.* The student's guide to cognitive neuroscience. London: Routledge, 2019. 538 p.
29. *Weaver M.D., Hickey C., Van Zoest W.* The impact of salience and visual working memory on the monitoring and control of saccadic behavior: An eye-tracking and EEG study // *Psychophysiology*. 2017. Vol. 54. № 4. P. 544—554. DOI:10.1111/psyp.12817
30. *Yeung N.* Conflict monitoring and cognitive control // The Oxford Handbook of Cognitive Neuroscience / Eds. K.N. Ochsner, S.M. Kosslyn. New York: Oxford University Press, 2014. Vol. 2: The Cutting Edges. P. 275—299. DOI:10.1093/oxfordhb/9780199988709.013.0018

References

1. Nunez-Estupinan X., Berticelli L.Z., de Almeida R.M.M., Gauer G. Aversiveness of errors and the error-related negativity (ERN): A systematic review on the affective states' manipulations findings. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 2022. Vol. 22, no. 4, pp. 754—776. DOI:10.3758/s13415-022-01002-2
2. Baddeley A. Working memory. In Baddeley A., Eysenck M.W., Anderson M.C. (eds.), *Memory*. London: Routledge, 2020, pp. 71—111.
3. Clayson P.E., Larson M.J. The impact of recent and concurrent affective context on cognitive control: An ERP study of performance monitoring. *International Journal of Psychophysiology*, 2019. Vol. 143, pp. 44—56. DOI:10.1016/j.ijpsycho.2019.06.007
4. Coleman J.R., Watson J.M., Strayer D.L. Working memory capacity and task goals modulate error related ERPs. *Psychophysiology*, 2018. Vol. 55, no. 3, article ID e12805. 14 p. DOI:10.1111/psyp.12805
5. Steinhauser R., Wirth R., Kunde W., Janczyk M., Steinhauser M. Common mechanisms in error monitoring and action effect monitoring. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 2018. Vol. 18, pp. 1159—1171. DOI:10.3758/s13415-018-0628-y
6. Cristofori I., Cohen-Zimmerman S., Grafman J. Executive functions. In Aminoff M.J., Boller F., Swaab D.F. (ser. eds.), *Handbook of clinical neurology*. Amsterdam: Elsevier, 2019. Vol. 163, pp. 197—219. DOI:10.1016/B978-0-12-804281-6.00011-2
7. Diamond A. Executive functions. *Annual review of psychology*, 2013. Vol. 64, pp. 135—168. DOI:10.1146/annurev-psych-113011-143750
8. Diamond A. Executive functions. In Aminoff M.J., Boller F., Swaab D.F. (ser. eds.), *Handbook of clinical neurology*. Amsterdam: Elsevier, 2020. Vol. 173, pp. 225—240. DOI:10.1016/B978-0-444-64150-2.00020-4
9. Hobson N.M., Saunders B., Al-Khindi T., Inzlicht M. Emotion down-regulation diminishes cognitive control: a neurophysiological investigation. *Emotion*, 2014. Vol. 14, no. 6, pp. 1014—1026. DOI:10.1037/a0038028
10. Maier M., Scarpazza C., Starita F., Filogamo R., L davas E. Error monitoring is related to processing internal affective states. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 2016. Vol. 16, pp. 1050—1062. DOI:10.3758/s13415-016-0452-1
11. Suzuki T., Oumeziane B.A., Novak K., Samuel D.B., Foti D. Error-monitoring across social and affective processing contexts. *International Journal of Psychophysiology*, 2020. Vol. 150, pp. 37—49. DOI:10.1016/j.ijpsycho.2020.01.009
12. Chen N., Lu J., Jin L., Li X. High emotion-control value reduces error-detection impairment following emotion suppression: an event-related potential study. *NeuroReport*, 2017. Vol. 28, no. 12, pp. 760—765. DOI:10.1097/WNR.0000000000000840
13. Salehinejad M.A., Ghanavati E., Rashid M.H.A., Nitsche M.A. Hot and cold executive functions in the brain: A prefrontal-cingular network. *Brain and Neuroscience Advances*, 2021. Vol. 5, article ID 23982128211007769. 19 p. DOI:10.1177/23982128211007769
14. Ikeda K., Hasegawa T. Task confusion after switching revealed by reductions of error-related ERP components. *Psychophysiology*, 2012. Vol. 49, no. 3, pp. 427—440. DOI:10.1111/j.1469-8986.2011.01295.x
15. Kihlstrom J.F. Ecological validity and “ecological validity”. *Perspectives on Psychological Science*, 2021. Vol. 16, no. 2, pp. 466—471. DOI:10.1177/17456916209667
16. Maier M.E., Steinhauser M. Working memory load impairs the evaluation of behavioral errors in the medial frontal cortex. *Psychophysiology*, 2017. Vol. 54, no. 10, pp. 1472—1482. DOI:10.1111/psyp.12899
17. Arake M., Ohta H., Tsuruhara A., Kobayashi Y., Shinomiya N., Masaki H., Morimoto Y. Measuring task-related brain activity with event-related potentials in dynamic task scenario with immersive virtual reality environment. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 2022. Vol. 16, article ID 779926. 9 p. DOI:10.3389/fnbeh.2022.779926

18. Miller A.E., Watson J.M., Strayer D.L. Individual differences in working memory capacity predict action monitoring and the error-related negativity. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 2012. Vol. 38, no. 3, pp. 757—763. DOI:10.1037/a0026595
19. Paul K., Walentowska W., Bakic J., Dondaine T., Pourtois G. Modulatory effects of happy mood on performance monitoring: Insights from error-related brain potentials. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 2017. Vol. 17, pp. 106—123. DOI:10.3758/s13415-016-0466-8
20. Nigbur R., Ullsperger M. Funny kittens: Positive mood induced via short video-clips affects error processing but not conflict control. *International Journal of Psychophysiology*, 2020. Vol. 147, pp. 147—155. DOI:10.1016/j.ijpsycho.2019.11.007
21. Pailing P.E., Segalowitz S.J. The effects of uncertainty in error monitoring on associated ERPs. *Brain and cognition*, 2004. Vol. 56, no. 2, pp. 215—233. DOI:10.1016/j.bandc.2004.06.005
22. Saunders B., Milyavskaya M., Inzlicht M. What does cognitive control feel like? Effective and ineffective cognitive control is associated with divergent phenomenology. *Psychophysiology*, 2015. Vol. 52, no. 9, pp. 1205—1217. DOI:10.1111/psyp.12454
23. Steinhauser M., Andersen S.K. Rapid adaptive adjustments of selective attention following errors revealed by the time course of steady-state visually evoked potentials. *Neuroimage*, 2019. Vol. 186, pp. 83—92. DOI:10.1016/j.neuroimage.2018.10.059
24. Xiao Y., Ma F., Lv Y., Cai G., Teng P., Xu F., Chen S. Sustained attention is associated with error processing impairment: evidence from mental fatigue study in four-choice reaction time task. *PLoS one*, 2015. Vol. 10, no. 3, article ID e0117837. 15 p. DOI:10.1371/journal.pone.0117837
25. Gehring W.J., Liu Y., Orr J.M., Carp J. The error-related negativity (ERN/Ne). In Luck S.J., Kappenman E.S. (eds.), *The Oxford handbook of event-related potential components*. New York: Oxford University Press, 2012, pp. 231—291. DOI:10.1093/oxfordhb/9780195374148.013.0120
26. Overmeyer R., Berghäuser J., Dieterich R., Wolff M., Goschke T., Endrass T. The error-related negativity predicts self-control failures in daily life. *Frontiers in human neuroscience*, 2021. Vol. 14, article ID 614979. 12 p. DOI:10.3389/fnhum.2020.614979
27. LoTempio S., Silcox J., Murdock R., Strayer D., Payne B. To err is human-to understand error-processing is divine: Contributions of working memory and anxiety to error-related brain and pupil responses. *Psychophysiology*, 2023. Vol. 60, no. 12, article ID e14392. 21 p. DOI:10.1111/psyp.14392
28. Ward J. *The student's guide to cognitive neuroscience*. London: Routledge, 2019. 538 p.
29. Weaver M.D., Hickey C., Van Zoest W. The impact of salience and visual working memory on the monitoring and control of saccadic behavior: An eye-tracking and EEG study. *Psychophysiology*, 2017. Vol. 54, no. 4, pp. 544—554. DOI:10.1111/psyp.12817
30. Yeung N. Conflict monitoring and cognitive control. In Ochsner K.N., Kosslyn S.M. (eds), *The Oxford Handbook of Cognitive Neuroscience*. New York: Oxford University Press, 2014. Vol. 2: The Cutting Edges, pp. 275—299. DOI:10.1093/oxfordhb/9780199988709.013.0018

Информация об авторах

Мачнев Евгений Геннадьевич, аспирант, младший научный сотрудник, Научно-технологический университет «Сириус» (АНОО ВО «Университет “Сириус”»), пгт. Сириус, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3881-6029>, e-mail: machnev.eg@talantiuspeh.ru

Таланцева Оксана Игоревна, старший специалист, Научно-технологический университет «Сириус» (АНОО ВО «Университет “Сириус”»), пгт. Сириус, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7555-1216>, e-mail: talantseva.oi@talantiuspeh.ru

Момотенко Дарья, младший научный сотрудник, Научно-технологический университет «Сириус» (АНОО ВО «Университет “Сириус”»), пгт. Сириус, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2544-5420>, e-mail: daryamomotenko@gmail.com

Information about the authors

Evgeniy G. Machnev, Phd Student, Junior Researcher, Scientific Center for Cognitive Research, Sirius University of Science and Technology, Sirius, Krasnodar region, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3881-6029>, e-mail: machnev.eg@talantiuspeh.ru

Oksana I. Talantseva, Senior Specialist, Scientific Center for Cognitive Research, Sirius University of Science and Technology, Sirius, Krasnodar region, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7555-1216>, e-mail: talantseva.oi@talantiuspeh.ru

Darya Momotenko, Junior Researcher, Scientific Center for Cognitive Research, Sirius University of Science and Technology, Sirius, Krasnodar region, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2544-5420>, e-mail: daryamomotenko@gmail.com

Получена 03.05.2024

Received 03.05.2024

Принята в печать 25.07.2024

Accepted 25.07.2024