

**ФИЗИОЛОГИЯ ВЫСШЕЙ НЕРВНОЙ (КОГНИТИВНОЙ)
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА**

УДК 612.821

**ВЕГЕТАТИВНЫЕ И ПОВЕДЕНЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ
ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ КОГНИТИВНОЙ НАГРУЗКИ
У ЗДОРОВЫХ ДОБРОВОЛЬЦЕВ**

© 2022 г. Г. В. Портнова^{1, 2, *}, К. М. Левкович¹, Л. Н. Васильева¹, Е. И. Альшанская³

¹ФГБУН Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва, Россия

²Государственный институт русского языка им. А.С. Пушкина, Москва, Россия

³Департамент психологии, Национальный исследовательский университет
“Высшая школа экономики”, Москва, Россия

*e-mail: caviter@list.ru

Поступила в редакцию 01.11.2021 г.

После доработки 16.04.2022 г.

Принята к публикации 26.04.2022 г.

Когнитивная и эмоциональная нагрузка в ходе увеличения сложности задач приводит к активации различных звеньев вегетативной нервной системы и может сопровождаться как увеличением эффективности решения задач, так и способствовать дестабилизации эмоционального состояния и уменьшению продуктивности. Увеличение когнитивной нагрузки при условии высокой мотивации испытуемых является стрессовым фактором и выражается в различной реакции симпатического и парасимпатического звеньев в ответ на нагрузку. Целью данного исследования было изучить особенности разнообразных вегетативных реакций в ответ на постепенно увеличивающуюся сложность задач, что включало в себя регистрацию площади зрачка и количества морганий, а также частоты дыхательных движений, показателей вариабельности сердечного ритма и кожно-гальванической реакции. В исследовании приняли участие 10 здоровых добровольцев. Экспериментальная парадигма включала в себя шесть уровней сложности задач, требующих активного участия оперативной памяти и внимания. Увеличение сложности задачи с первого по шестой уровень приводило к плавному увеличению площади зрачка и количества морганий, что, как мы полагаем, соответствует усилению активации симпатической нервной системы. Линейное изменение вегетативных показателей дыхательной и сердечно-сосудистой систем, а также электрической активности кожи наблюдалось лишь до третьего уровня сложности. Дальнейшее увеличение сложности приводило к противоположной динамике данных показателей и сопровождалось снижением эффективности решения задач. Более выраженная динамика кожно-гальванической реакции при решении задач коррелировала со снижением настроения после исследования, что косвенно свидетельствует о более высоком уровне эмоционального напряжения.

Ключевые слова: вегетативная нервная система, айтрекер, полиграфия, вариабельность сердечного ритма, кожно-гальваническая реакция, размер зрачка

DOI: 10.31857/S0044467722040098

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение уровня сложности задач, как правило, является стрессовым фактором у человека и способствует мобилизации симпатической нервной системы, особенно в условиях повышенной мотивации. В данном случае решающим оказывается взаимодействие между центральными и периферическими звеньями вегетативной нервной системы, ко-

гда для ответной реакции на стрессовые факторы вовлекаются лимбическая система, префронтальная и височная кора, отвечающие за мотивационные и эмоциональные процессы и регулирующие влияние вегетативной нервной системы на сердечно-сосудистую, дыхательную функции, а также на диаметр зрачка (De Morree et al., 2013). Данные предыдущих исследований свидетельствуют о том, что увеличение сложности когнитивных задач

вызывает преимущественно симпатическую реакцию, что было обнаружено при помощи фотоплетизмограммы (ФПГ) и электрокардиограммы (ЭКГ) у субъектов, находящихся в стрессовой ситуации. Было обнаружено, что уменьшение амплитуды пульсовой волны, сигнализирующее о сужении сосудов, происходит, когда субъекты прилагают больше усилий для решения задач (Мартынова и др., 2011; Iani et al., 2004; Kreibig, Gendolla, 2014). Также к увеличению рабочей нагрузки чувствительными оказались разные параметры variability сердечного ритма и частота дыхания (Veltman, Gaillard, 1998), которые имеют огромное значение для оценки не только увеличения симпатического влияния на дыхательный и сердечный ритм, но и для анализа состояния симпатической и парасимпатической систем и их влияния на все функции организма, в том числе и на мыслительную деятельность (Pereira et al., 2017).

Необходимость мобилизовать дополнительные умственные ресурсы для решения поставленных перед человеком задач также сказывались и на изменении других вегетативных показателей, в частности, было обнаружено, что средняя амплитуда кожно-гальванической реакции (КГР) увеличивается вместе со сложностью задания (Kreibig, Gendolla, 2014). Также при увеличении умственной нагрузки были зарегистрированы изменения просвета зрачка и частоты морганий. Так, отдельными исследовательскими группами было обнаружено, что при увеличении объема поступающей информации, необходимой для анализа и обработки конкретной задачи, время между двумя последовательными морганиями глаз (интервал моргания) увеличивалось, а продолжительность моргания уменьшалась (Veltman, Gaillard, 1998), а просвет зрачка при увеличении когнитивной нагрузки значимо увеличивался (Krejtz et al., 2018).

Реакция организма на стрессовый фактор вследствие необходимости увеличения работоспособности не является сама по себе негативной реакцией, а напротив, свидетельствует о возможностях организма адекватно реагировать на изменчивость окружающей среды (Wheaton, Montazer, 2010). При этом увеличение симпатического влияния не может быть бесконечным, и в какой-то момент возникает срыв адаптации, за которым может следовать как неуспешность в решении поставленных задач, так и вегетативная дисре-

гуляция (Corrigan et al., 2011). Особую роль в этом процессе играет мотивация. Об этом свидетельствует закон Йеркса-Додсона, согласно которому наилучшие результаты достигаются при оптимальном уровне мотивации и при ее дальнейшем увеличении происходит падение эффективности решения задач. Таким образом, если мотивация слишком сильна, увеличивается уровень психического напряжения, вследствие чего возникают нежелательные эмоциональные и вегетативные реакции, что приводит к ухудшению деятельности (Khazaei et al., 2021; Раудис, Юстицкис, 2008).

Вегетативные феномены имеют разную и подчас крайне сложную регуляцию со стороны вегетативной нервной системы. В частности, регуляция частоты сердечного ритма (ЧСС) осуществляется за счет разнообразных интракардиальных рефлексов, являющихся частью метасимпатической нервной системы (Shiels, White, 2008), подверженных влиянию симпатической и парасимпатической нервных систем, а также активацией экстракардиальных рефлексов, запускаемых концентрацией в крови определенных гормонов и метаболитов (Biondi et al., 2002) и других рефлексов. Влияние парасимпатической нервной системы на просвет зрачка осуществляется парасимпатической веточкой глазодвигательного нерва, вызывающей сужение зрачка, а регуляция симпатической нервной системы осуществляется волокнами, исходящими от верхнего шейного симпатического ганглия. Таким образом, для наилучшего понимания изменений со стороны вегетативной нервной системы у субъекта, находящегося в состоянии стресса вследствие увеличения сложности задач, необходимо исследовать не только показатели ЭКГ, КГР и РД, но и диаметр зрачка и интервал моргания, имеющих разную вегетативную регуляцию.

Для создания ситуации когнитивного и эмоционального напряжения у добровольцев в лабораторных условиях в качестве стимульного материала чаще всего использовались арифметические задачи (Wang et al., 2005), сокращение времени при выполнении задач или же предъявляются дополнительные отвлекающие факторы (например, включение звуковых стимулов) (Bigliassi et al., 2018). В клинических исследованиях для создания стрессовой ситуации используют также тест с холодным воздействием, социальный стресс-тест Триера, стресс-тест Монреаля с визуализаци-

ей, тест острого стресса Маастрихта, тест с провокацией CO_2 , тест Струпа, тест на слуховое последовательное сложение на скорость, шумовой стресс и многокомпонентный тест Мангейма (см. обзор, Bali, Jaggi, 2015). Однако провокация психологического стресса при помощи большинства вышеприведенных методик значительно зависит от индивидуальных когнитивных навыков. Важным вопросом является субъективная сложность задачи. Если задача является слишком простой, то незначительное увеличение ее сложности не может значимо повлиять на вегетативную регуляцию. Если же, напротив, увеличение сложности приводит к тому, что задача становится слишком сложной, вегетативные изменения, связанные с увеличением влияния симпатической нервной системы на сердечно-сосудистую систему, не помогут эффективному решению задач (Ernst, 2017). Новизной нашего исследования является адаптация разработанных ранее параметрических задач с повышением сложности, созданных для тестирования возрастных особенностей направленного внимания и емкости рабочей памяти, к изучению вегетативных изменений при постепенном увеличении когнитивной нагрузки (Arsalidou et al., 2010). Решение таких задач с повышением уровня сложности вызывало постепенное повышение произвольного внимания и объема рабочей памяти у лиц разного возраста (Arsalidou, Im-Bolter, 2017). Данные задачи можно использовать как для разных возрастов, так и для пациентов с умеренным когнитивным дефицитом, а также для носителей разных языков, что делает предлагаемый нами протокол создания когнитивной нагрузки и ментального стресса унифицированным. Также используемые нами задачи имеют одинаковое количество изображенных элементов, что позволяет выровнять изображения по яркости и по углу просмотра, что является необходимым условием при регистрации движений глаз и изменения диаметра зрачка. Таким образом, в данном исследовании была впервые применена специально адаптированная для одновременной регистрации вегетативных параметров и движений глаз парадигма с использованием вышеописанных когнитивных задач, что позволило постепенно дозировать увеличение когнитивной и эмоциональной нагрузки у испытуемых и изучить соответствующую ей совокупность вегетативных и поведенческих изменений.

МЕТОДИКА

Испытуемые

В данном исследовании приняли участие 10 здоровых добровольцев (средний возраст 26 ± 9.10 года, 7 женщин). При наборе участников проводили анкетирование с целью оценки зрения, соматического и психического здоровья. Критерии исключения из эксперимента были следующими: нарушения зрения, острые или хронические заболевания, перенесенные черепно-мозговые травмы, прием любых медикаментов, алкогольная или наркотическая зависимость, нарушенный режим сна и бодрствования. Девушки приглашались на 6–14 день цикла (средний день цикла 9 ± 2.48).

Перед началом экспериментальной сессии испытуемые были осведомлены о предмете и процедуре исследования и подтвердили свое добровольное участие подписанием информированного согласия. Протоколы исследования были составлены в соответствии с требованиями Хельсинкской декларации и одобрены этической комиссией Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН (Протокол № 1 от 25 февраля 2021 г.).

Процедура

После подписания информированного согласия участники исследования заполняли опросники “Шкала сонливости Эпворта” и “Самочувствие. Активность. Настроение” (САН). После этого фиксировались датчики ЭКГ, КГР и рекурсии дыхания (РД). Перед записью основной экспериментальной серии испытуемые знакомились с задачей. После этого проводилась тренировочная сессия. Она проводилась столько раз, сколько это требовалось для добровольца. Только после того, как задание было понято и все пробы выполнены правильно, начиналась запись основной экспериментальной сессии. По окончании экспериментальной сессии доброволец в любом случае получал 250 рублей. От количества правильных ответов зависела дополнительная сумма вознаграждения. Максимум дополнительного выигрыша — 750 рублей.

После экспериментальной сессии испытуемые повторно заполняли опросник САН.

Опросники на определение физиологического и психоэмоционального состояния

Шкала сонливости Эпворта. Для контроля избыточного уровня дневной сонливости использовалась шкала сонливости Эпворта (Меркулова, Рассказова, 2018; Johns, 1991). Испытуемым предлагалось оценить вероятность задремать в восьми ситуациях по шкале от нуля до трех, где 0 — вероятность задремать небольшая, а 3 — высокая.

Самочувствие. Активность. Настроение. В 1973 году отечественные врачи (Доскин В.А., Лаврентьева Н.А., Шарай В.Б., Мирошников М.П.) разработали методику для определения функционального психоэмоционального состояния. Основная идея данной методики заключается в том, что основой психоэмоционального состояния являются три состояния — самочувствие, активность, настроение, и каждое из этих состояний имеет два полярных состояния и континуум промежуточных состояний между ними.

До и после выполнения основной экспериментальной сессии испытуемых попросили заполнить таблицу, чтобы оценить текущее психоэмоциональное состояние. Таблица состояла из 30 пар слов, 10 пар — для каждого из состояний. Одна пара слов состояла из двух характеристик состояния с его полярными значениями, и рейтинговой шкалой между ними, например, “Полный сил 3 2 1 0 1 2 3 Обессиленный”. Испытуемому нужно было выбрать ту характеристику, которая наиболее точно описывала его состояние, и выбрать цифру, которая бы соответствовала степени выраженности данной характеристики.

Стимулы и экспериментальный дизайн

Стимульный материал был ранее апробирован в ряде работ (Arsalidou et al., 2010; Vachurina, Arsalidou, 2019).

В исследовании были использованы задачи шести уровней сложности, в которых предъявлялись картинка с воздушными шариками разных цветов. Два цвета (зеленый и синий) были базовыми, и на них не нужно было реагировать. Остальные цвета были частью задания. Задачей испытуемого было запомнить цвета шариков и если при последующем предъявлении они изменятся (категория задачи D — different, отличающийся)

нажать — 2, если останутся прежними (категория задачи S — same, совпадающий) — 1.

Уровни сложности определялись количеством шариков, у которых менялся цвет. На первом уровне сложности только у одного из шариков мог меняться цвет, и испытуемому приходилось запоминать только один цвет, на шестом уровне приходилось запоминать шесть цветов (рис. 1).

Испытуемым давалась следующая инструкция: “Перед вами будут появляться картинки с шариками разных цветов. Вам нужно будет сравнить картинку с предыдущей и ответить, совпадают ли цвета. Все цвета — часть игры, кроме синего и зеленого. Если вы видите все синие или все зеленые шарики, отвечать не нужно. Картинки будут появляться на короткое время. Постарайтесь отвечать как можно точнее и быстрее. Если цвета совпадают, нажмите на клавишу 1, если отличаются — на клавишу 2. Шарики одинаковых цветов — это сигнал, что уровень закончился, и вас попросят оценить, насколько хорошо вы справились с поставленной задачей. В данной игре неважно положение шариков, а важны только цвета. Если вы отвечаете верно, то появляется улыбающийся смайлик, если неверно или вы не успели ответить в течение трех секунд — грустный смайлик. По окончании игры вы в любом случае получите 250 рублей. А чем больше правильных ответов, тем выше сумма выигрыша. Максимум дополнительного выигрыша — 750 рублей”.

В тестовой сессии блок состоял из первых двух уровней сложности. Каждый уровень состоял из 9 проб. В 18 пробах было: 9 проб, в которых картинка с шариками, не совпадала с предыдущей; 5 проб, в которых картинка с шариками, совпадала с предыдущей; и по 2 пробы, в которых картинка с шариками была первой в каждом уровне и картинка с шариками одного цвета (синего или зеленого) в конце каждого уровня.

В основной экспериментальной серии каждый блок (первый и последний) состоял из шести уровней сложности. Каждый уровень состоял из 17 проб. Всего в каждом блоке было 102 пробы, из них: 6 проб, в которых первую картинку с шариками в каждом уровне нужно было запомнить; 49 проб, в которых картинка с шариками не совпадала с предыдущей, поэтому нужно было нажать на 2; 41 проба, в которой картинка с шариками, совпадала с предыдущей, и поэтому нужно

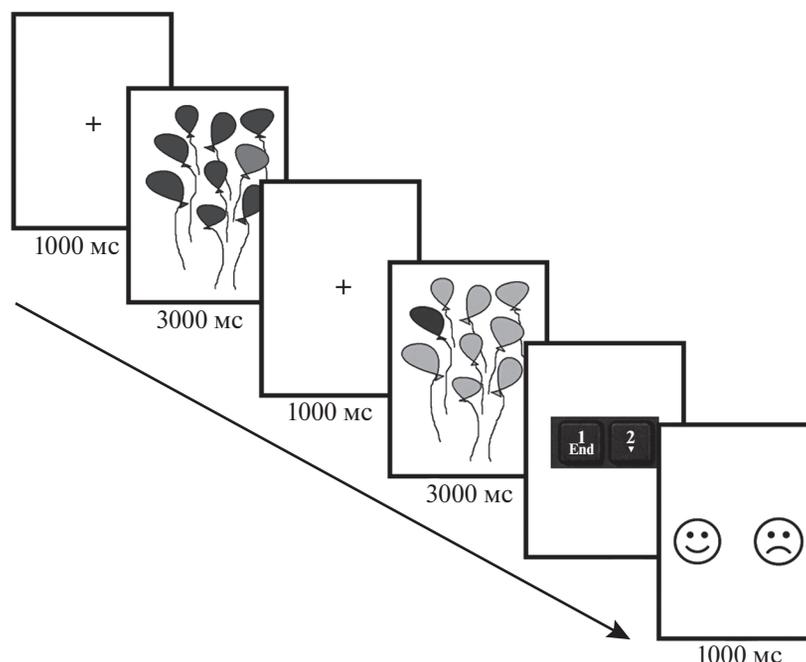


Рис. 1. Схема экспериментальной парадигмы на примере задачи первого уровня сложности – категория D (цвет шариков различается между пробами).

Fig. 1. Scheme of the experimental paradigm with an example of the trials in the first difficulty level for type D (the color of balloons differs between trials).

было нажать на 1; и 6 проб, в которых картинка с шариками синих или зеленых цветов в конце каждого уровня сигнализировала о завершении уровня, поэтому ни на какую цифру не нужно было нажимать, т.к. после этого начинался новый уровень и запоминать приходилось сначала.

На рис. 1 изображен пример пробы. Каждая проба начиналась с фиксационного креста длительностью 1 с (размер изображения 20.3*13.6 угловых градусов). После этого на три секунды появлялось изображение с шариками (размер изображения 14.5*14.8 угловых градусов) и испытуемый должен был сравнить текущий цвет шариков с тем, что предъявлялся непосредственно до этого. Если испытуемый успевал ответить, совпадают ли картинки или нет, в течение трех секунд, то получал обратную связь в зависимости от правильности своего ответа в виде смайлика (улыбающегося, если правильный ответ, или грустного, если не правильный ответ), если не успевал ответить – то только в виде грустного смайлика. Длительность картинки со смайликом – обратной связью (размер 20.3*13.6 угловых градусов) – 1 с. После каждого блока был отдых (около 30 с), когда че-

ловек мог снять голову с подбородочной опоры и подвигаться.

В среднем решение задач каждого уровня занимало у испытуемого чуть больше минуты, решение одного блока – 7 минут, а решение всех экспериментальных задач занимало у испытуемых не более 23 минут.

Регистрация поведенческих показателей

Время решения задачи (время от появления изображения с шариками до нажатия на клавишу для ответа) для каждого блока и уровня анализировались отдельно. Количество правильных и неправильных ответов автоматически подсчитывалось после завершения экспериментальной сессии, и полученная стоимость выдавалась добровольцу в конце эксперимента. Данные для анализа были получены с помощью программы Eye-Link Experiment Builder 2.3.1 (Mississauga, Ontario, Canada: SR Research Ltd., 2020), см. рис. 2.

Регистрация полиграфических данных

Для оценки вегетативных показателей регистрировались данные ЭКГ, КГР и РД при помощи реографа-полианализатора РГПА-6/12

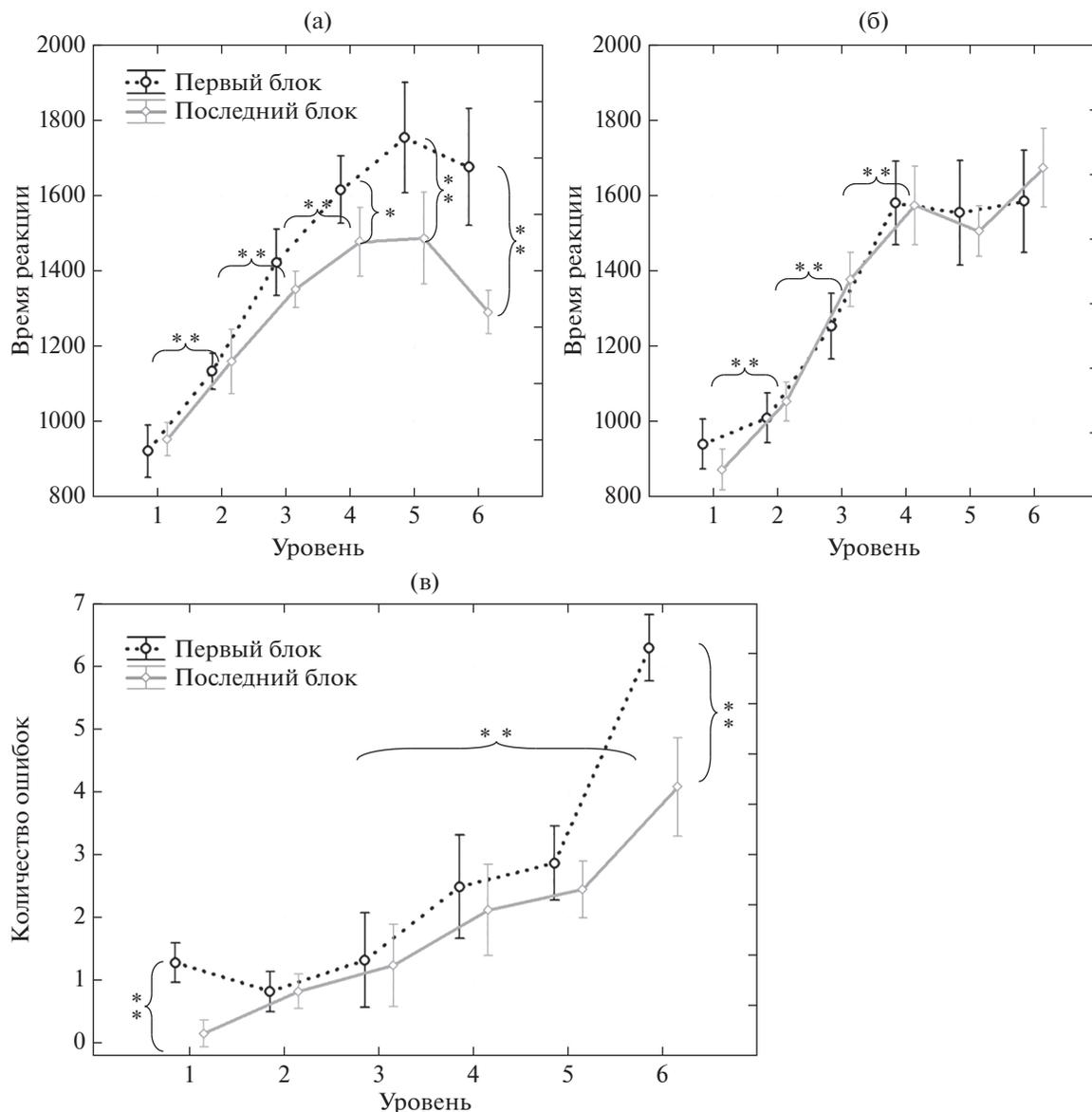


Рис. 2. (а) – Время решения задач для задач типа D (цвет шариков различается). (б) – Время решения задач для задач типа S (цвет шариков не различается). (в) – Количество ошибок суммарно по задачам типа S и D в первом и последнем блоках. * – $p < 0.05$, ** – $p < 0.01$.

Fig. 2. (a) – Reaction time for trials of type D (the color of balloons differs). (б) – Reaction time for trials of type S (the color of balloons does not differ). (в) – The number of errors in total for tasks of type S and D in the first and last blocks. * – $p < 0.05$, ** – $p < 0.01$. Continuous light grey line shows the first block, dotted black line shows the last block.

“Реан-Поли” (версия от 02.02.2010, Медиком-МТД, Таганрог, Россия). Частота дискретизации – 250 Гц.

Для регистрации ЭКГ датчики были поставлены на правое и левое запястья и правую щиколотку. Фильтры были в полосе 0.5–75 Гц.

Для регистрации КГР (КГР, %) датчики были поставлены на дистальную фалангу указательного и безымянного пальцев левой руки. Полоса фильтрации – 0.05–2 Гц.

Для регистрации рекурсии дыхания (РД) абдоминальной датчик был установлен на область диафрагмы. Полоса фильтрации – 0.05–5 Гц.

Анализ вегетативных параметров

Анализ данных ЭКГ. Анализ полиграфических данных проводился при помощи приложений для Matlab (LEDALAB, HRVTool и др.).

Для расшифровки показателей ЭКГ анализировались частота сердечных сокращений (ЧСС, уд./мин), индекс вагосимпатического взаимодействия LF/HF (Баевский, 2001) и lnRMSSD для оценки вариабельности сердечного ритма.

Индекс вагосимпатического взаимодействия LF/HF рассчитывался по данным спектрального анализа (при помощи преобразования Фурье) сердечного ритма для интервалов длительностью не менее 60 сек. Согласно полученным ранее данным (Fornasa, 2014; Holper et al., 2016), измерение данного индекса возможно и для более коротких интервалов (около 2 мин), поэтому расчет проводился для каждого уровня сложности.

Для оценки *вариабельности сердечного ритма* использовался параметр lnRMSSD – логарифмированный квадратный корень из суммы квадратов разности величин последовательных пар интервалов RR (Shaffer, Ginsberg, 2017). Ориентируясь на результаты исследований, в которых была показана сопоставимость использования 1-минутных и 5-минутных отрезков ЭКГ для анализа вариабельности ЭКГ (Esco, Flatt, 2014), мы анализировали вариабельность ЧСС (HRV) для диапазонов ЭКГ не менее 60 сек (68.4 ± 2.4 сек).

Анализ параметров КГР и РД. Вычислялась средняя амплитуда КГР в кОм (за уровень) и ее стандартное отклонение. Таким образом, эти показатели отражали как тоническую, так и фазическую составляющую электрической активности кожи (ЭАК), однако стандартное отклонение КГР больше направлено на оценку фазической составляющей, т.е. изменения ЭАК.

Так как для нас был важен сравнительный анализ при решении задач разных уровней сложности, мы отдельно считали средний показатель КГР и его стандартное отклонение для каждого уровня. Фоновые показатели КГР считались для состояния, предшествующего решению задач (1 мин до начала решения задач).

Для расшифровки показателей РД анализировалась частота дыхательных движений (ЧДД, кол./мин). Фоновые показатели РД считались для состояния, предшествующего решению задач (1 минута до начала решения задач), и отмечались пунктирной линией на рис. 3 и 4.

Регистрация движений глаз. Регистрация движений глаз проводилась с помощью ай-

трекера EyeLink Portable Duo (SR Research Ltd., Канада). Во время эксперимента записывали движения и площадь зрачка каждого глаза, но анализировали только данные правого глаза. Последовательность событий в эксперименте была задана с помощью программы EyeLink Experiment Builder 2.3.1 (Mississauga, Ontario, Canada: SR Research Ltd., 2020).

Во время эксперимента добровольцев просили держать голову на подбородочной опоре для фиксации головы. Перед началом каждого из трех блоков эксперимента выставляли пороги для детекции зрачка и роговичного отражения на изображении с инфракрасной камеры. По этим двум параметрам определялось направление взгляда. Проводили калибровку прибора по 9 точкам в начале каждого из трех блоков эксперимента. Измерения амплитуды движений глаз осуществлялись в угловых градусах, площадь зрачка – в произвольных единицах (arbitrary units). Зрачок детектировался алгоритмом центроида (centroid algorithm). Саккады определяли по порогу скорости перемещения взгляда на 30 угловых градусов и порогу амплитуды 0.1 углового градуса. Выделяли из записи моргания, длящиеся более 3 точек.

Предварительную обработку данных проводили в программе EyeLink Data Viewer 4.1.1. Площадь зрачка находили для каждой фиксации в промежутке от момента появления обратной связи на экране (улыбающийся или грустный смайлик) до окончания попытки (1000 мс). Данные по площади зрачка усредняли по уровням сложности и блокам для каждого добровольца и с получившимися значениями проводили дисперсионный анализ.

Для подсчета числа морганий использовали пакет eyelinker (Barthelme, 2021) в среде для программирования статистических расчетов R (R Core Team, 2021). Число морганий правым глазом рассчитывали для каждой попытки и суммировали их по уровню сложности и блоку.

Статистический анализ данных

Анализ данных проводился методом дисперсионного анализа для повторных измерений для следующих факторов: блок исследования (первый и последний) и уровень сложности (с первого по шестой). В исследовании мы использовали как однофакторный, так и

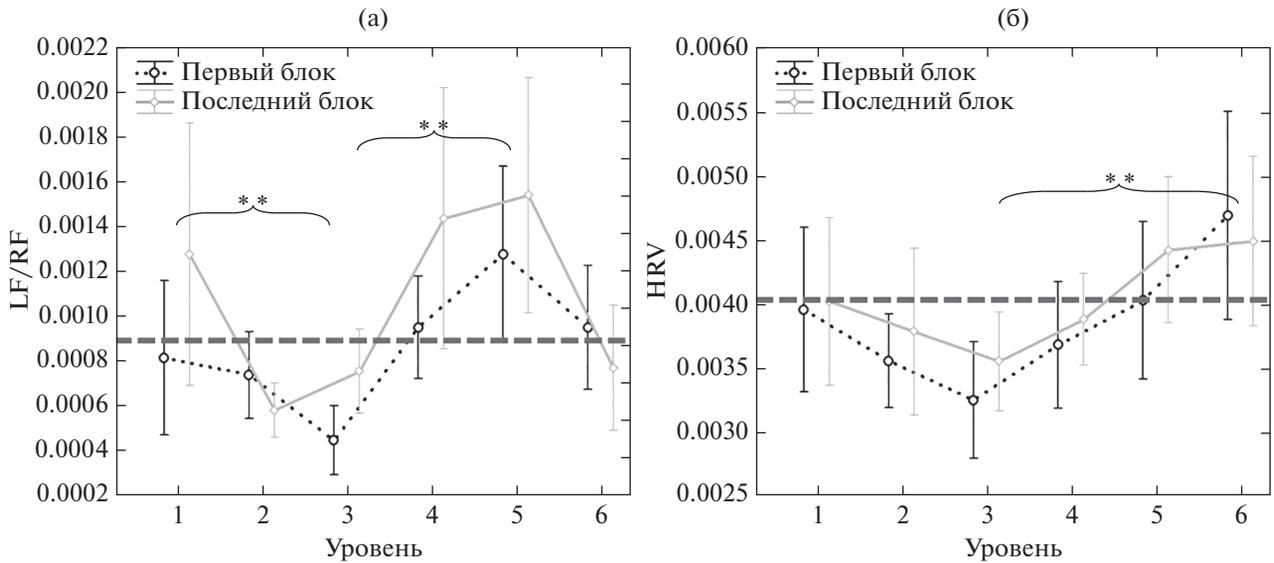


Рис. 3. Средние показатели и стандартное отклонение показателей variability сердечного ритма. (а) – Отношение между низкой и высокой частотой ЧСС (LF/HF). (б) – Показатель lnRMSSD для разных уровней сложности и первого и последнего блоков. * – $p < 0.05$, ** – $p < 0.01$. Серая пунктирная линия отображает величину среднего значения исследуемого показателя в течение 1–1.5 минуты до начала эксперимента.

Fig. 3. Mean and standard deviation of heart rate variability. (а) – The ratio between the low and high frequency (LF/HF) of heart rate variability. (б) – lnRMSSD index for different difficulty levels in the first and last blocks. * – $p < 0.05$, ** – $p < 0.01$. The gray dotted line shows the value of the average value of the studied indicator during 1–1.5 minutes before the start of the experiment. Continuous light grey line shows the first block, dotted black line shows the last block.

многофакторный дисперсионный анализ (ANOVA для повторных измерений). Выбор данного типа анализа был продиктован необходимостью оценить влияние таких факторов, как сложность задачи и адаптация к экспериментальной ситуации на вегетативные параметры, соответствующим образом определялись и степени свободы при проведении анализа. Поведенческие данные были проверены на нормальность распределения при помощи критерия Шапиро–Уилка и затем анализировались при помощи T -критерия Уилкоксона. Корреляционный анализ проводился при помощи непараметрического критерия Спирмена между вегетативными, поведенческими показателями и баллами психологических опросников, далее применялась поправка на множественное сравнение с учетом количества вегетативных показателей ($n = 7$) и количества поведенческих тестов ($n = 2$), а также количеством анализируемых опросников ($n = 3$). Для анализа использовались только показатели опросника САН.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Данные опросников на определение психоэмоционального состояния

В анализ включались только добровольцы, у которых уровень дневной сонливости по шкале сонливости Эпворта был < 13 баллов (средний уровень сонливости 9 ± 3 балла), что говорит об отсутствии избыточной дневной сонливости.

Данные по функциональному психоэмоциональному состоянию до и после основной экспериментальной сессии не различались: самочувствие ($p = 0.374$), активность ($p = 0.314$), настроение ($p = 0.484$).

Поведенческие результаты

Время реакции. Время решения задачи, как и ожидалось, увеличивалось при увеличении сложности задач ($F(5, 45) = 10.468, p = 0.002, \eta^2 = 0.47$) для обоих типов задач: когда цвета совпадали (S) и не совпадали (D). При этом, значимые различия между первым и последним блоками эксперимента обнаружены

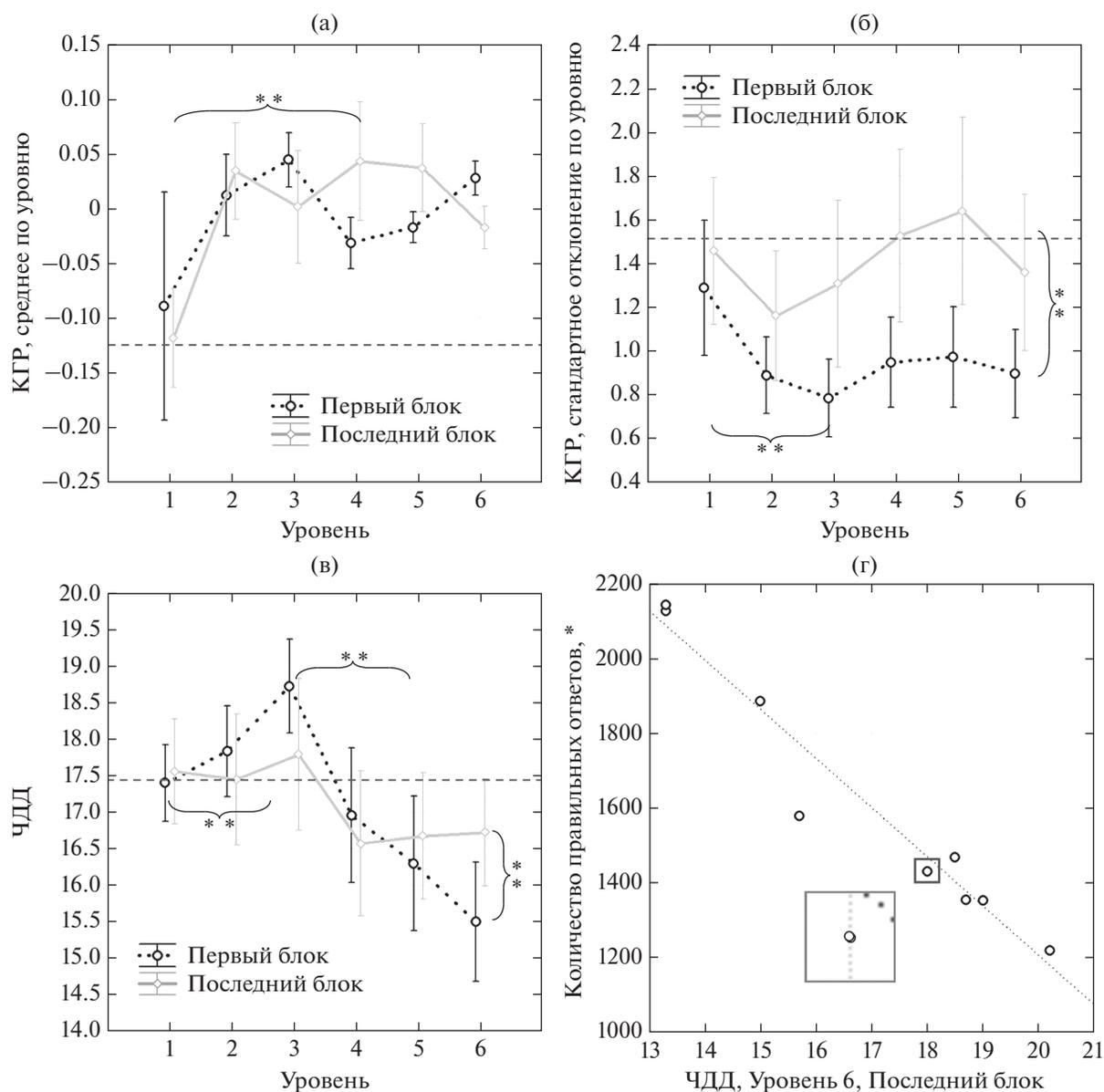


Рис. 4. Средние показатели и стандартное отклонение показателей кожно-гальванической реакции (КГР) и рекурсии дыхания. (а)–(б) – КГР среднее по уровню (а) и стандартное отклонение (б). (в) – Частота дыхательных движений (ЧДД); (г) – график корреляции между количеством правильных ответов и ЧДД в шестом уровне последнего блока. * – $p < 0.05$, ** – $p < 0.01$. Серая пунктирная линия отображает величину среднего значения исследуемого показателя в течение 1–1.5 минуты до начала эксперимента. (*) – количество правильных ответов для шестого уровня последнего блока. Серым квадратом показано увеличение, которое позволяет увидеть показатели испытуемых с близкими значениями.

Fig. 4. Mean and standard deviation of galvanic skin response (GSR) and respiratory rate. (a)–(б) – GSR average for each level (a) and standard deviation (б). (в)–(г) – Respiratory rate (RR) – (в); correlation graph between the number of correct answers and RR in the sixth level of the last block – (г). * – $p < 0.05$, ** – $p < 0.01$. The gray dotted line shows the averaged value of the studied indicator during 1–1.5 minutes before the start of the experiment. (*) – the number of correct answers for the sixth level of the last block. The gray square shows the increase, which reflects the performance of participants with similar values. Continuous light grey line shows the first block, dotted black line shows the last block.

только для 4 ($p < 0.05$), 5 и 6 уровней сложности ($p < 0.01$) типа D: в последнем блоке время решения этих задач значимо уменьшалось по сравнению с первым (рис. 2 (а), (б)).

Количество ошибок. Количество сделанных ошибок значимо увеличивалось при увеличении сложности решения задач ($F(5, 45) = 8.357, p = 0.007, \eta^2 = 0.44$) для обоих типов задач – (S) и (D). Количество сделанных ошибок также значимо различалось между блоками для первого и шестого уровня сложности (рис. 2 (б)): количество ошибок при решении задач первого и шестого уровней было значимо больше для первого блока по сравнению с последним ($F(10, 80) = 2.109, p = 0.033, \eta^2 = 0.39$).

Вегетативные показатели

Частота сердечных сокращений. Для данного показателя не обнаружено значимых различий между блоками и уровнями эксперимента.

Отношение между низкой и высокой частотой ЧСС (LF/HF). Данный показатель, отражающий регуляцию со стороны симпатической и парасимпатической систем, менялся при увеличении сложности задач. При увеличении сложности задачи от первого ко второму и третьему уровням наблюдалось значимое уменьшение данного показателя. Затем с третьего по пятый уровень наблюдалось его значимое увеличение, что соответствовало увеличению симпатической составляющей в регуляции ритма ЭКГ, однако при выполнении наиболее сложной задачи (уровень 6) данный показатель снова уменьшался: $F(5, 45) = 2.107, p = 0.037, \eta^2 = 0.37$ (рис. 3 (а)).

Вариабельность сердечного ритма (lnRMSSD). Вариабельность ЧСС также изменялась в зависимости от уровня сложности: наблюдалось уменьшение показателя с первого до третьего уровня и последующее ее увеличение вплоть до шестого уровня: $F(5, 45) = 2.201, p = 0.038, \eta^2 = 0.37$ (рис. 3 (б)).

Средняя по уровню амплитуда кожно-гальванической реакции (КГР). Среднее значение амплитуды КГР значимо увеличивалось с первого по второй уровень сложности задачи. Далее изменение данного показателя при увеличении уровня сложности варьировалось между первым и последним блоком ($F(5, 45) = 7.225, p = 0.009, \eta^2 = 0.42$). В частности, в первом блоке от третьего к четвертому и пятому уровню наблюдалось уменьшение сред-

него значения КГР, а к шестому уровню сложности регистрировался значимый прирост данного показателя. В последнем блоке среднее значение КГР по уровню не отличалось со второго по шестой (рис. 4 (а)).

Стандартное отклонение амплитуды КГР (по уровню сложности задач). Данный показатель различался между блоками и был значимо больше для последнего уровня по сравнению с первым: $F(5, 45) = 2.789, p = 0.029, \eta^2 = 0.41$. При этом, в отличие от последнего уровня, для первого была выявлена значимая динамика показателя при увеличении сложности задачи. В частности, с первого по третий уровень сложности наблюдалось значимое уменьшение стандартного отклонения амплитуды КГР ($p < 0.01$).

Частота дыхательных движений (ЧДД). При увеличении сложности задач динамика изменений в первом блоке была более выражена и состояла в значимом увеличении ЧДД с первого по третий уровень, а затем уменьшения с третьего по шестой уровень сложности (рис. 4 (в)). Значимые различия между первым и последним блоком были обнаружены для шестого уровня сложности. ЧДД при решении задачи на самом высоком уровне сложности была значимо больше в последнем блоке по сравнению с первым ($F(5, 45) = 7.399, p = 0.002, \eta^2 = 0.46$).

Площадь зрачка. При исследовании провета зрачка (рис. 5 (а)) по мере увеличения сложности задач было выявлено значимое увеличение его площади: $F(5, 45) = 10.755, p = 1e-6, \eta^2 = 0.53$. При этом значимые различия между первым и последним блоком наблюдались только для самого простого уровня сложности. В первом блоке площадь зрачка при первом уровне сложности задач была значимо больше: $F(5, 45) = 3.374, p = 0.011, \eta^2 = 0.42$.

Количество морганий. Количество морганий различалось между блоками и было значимо меньше в последнем блоке по сравнению с первым: $F(1, 9) = 19.016, p = 0.002, \eta^2 = 0.61$. При увеличении уровня сложности в обоих уровнях увеличивалось количество морганий: $F(5, 45) = 6.223, p = 0.0002, \eta^2 = 0.56$ (рис. 5 (б)).

Результаты корреляционного анализа

Был проведен корреляционный анализ между результатами психологических тестов,

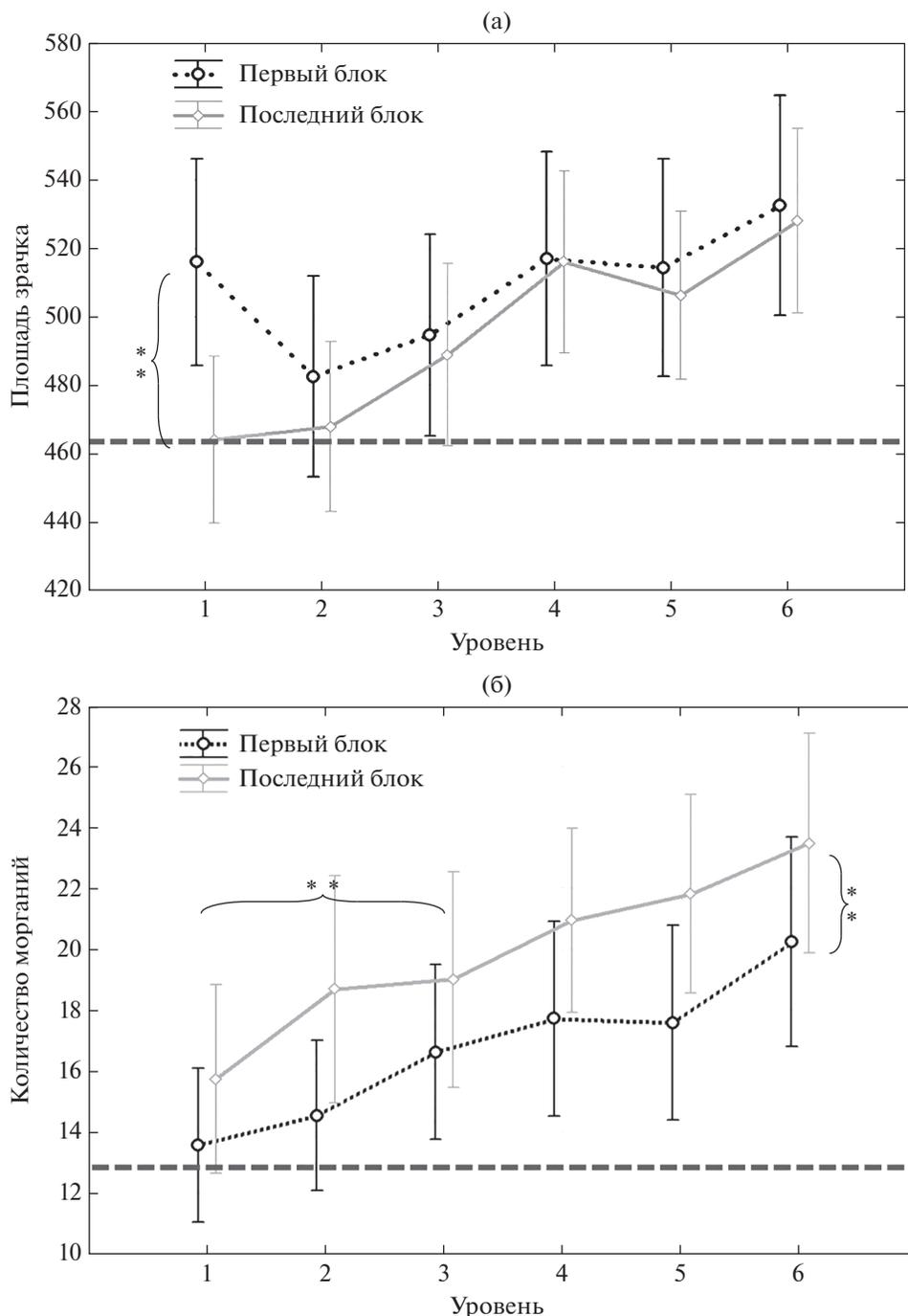


Рис. 5. Параметры площади зрачка и количество морганий (среднее за уровень). (а) – Усредненная площадь зрачка для разных уровней сложности и первого и последнего блоков. (б) – Усредненное количество морганий для разных уровней сложности и первого и последнего блоков. * – $p < 0.05$, ** – $p < 0.01$. Серая пунктирная линия отображает величину среднего значения исследуемого показателя в течение 1–1.5 минуты до начала эксперимента.

Fig. 5. Pupil area parameters and number of blinks (average per level). (а) – Averaged pupil area for different difficulty levels in the first and last blocks. (б) – The averaged number of blinks for different difficulty levels in the first and last blocks. * – $p < 0.05$, ** – $p < 0.01$. The gray dotted line shows the averaged value of the studied indicator during 1–1.5 minutes before the start of the experiment. The gray square shows the increase, which reflects the performance of participants with similar values. Continuous light grey line shows the first block, dotted black line shows the last block.

Таблица 1. Результаты корреляционного анализа между стандартным отклонением кожно-гальванической реакции (КГР) для разных уровней и блоков и шкалой «Настроения» опросника «Самочувствие. Активность. Настроение» (САН) после проведения экспериментального исследования (А) и разницей между показателями настроения до и после проведения исследования (Б) (Spearman Rank Order Correlations, $p < 0.05$). В ходе проведения корреляционного анализа не были выявлены значимые корреляции с показателями настроения до исследования, поэтому в таблице они не представлены

Table 1. Results of the correlation analysis between the standard deviation of the galvanic skin response (GSR) for different levels and blocks of the Study and the “Mood” scale of the questionnaire “Health, Activity, Mood” after the experimental study (A) and the difference between mood scores before and after the study (B) (Spearman Rank Order Correlations, $p < 0.05$). During the correlation analysis no significant correlations with mood indicators were found before the study, so they are not presented in the table

	А			Б		
	Spearman – R	t(n – 2)	p-level	Spearman – R	t(n – 2)	p-level
Первый блок 1 уровень	–0.68	–2.66	0.029	–0.69	–2.734	0.0261
Первый блок 2 уровень	–0.82	–4.02	0.004	–0.819	–4.031	0.0038
Первый блок 3 уровень	–0.71	–2.84	0.022	–0.64	–2.356	0.0462
Первый блок 4 уровень	–0.71	–2.84	0.022	–0.702	–2.785	0.0237
Первый блок 5 уровень	–0.81	–3.85	0.005	–0.64	–2.356	0.0462
Первый блок 6 уровень	–0.66	–2.49	0.038	–0.775	–3.474	0.0084
Последний блок 1 уровень	–0.88	–5.21	0.001	–0.849	–4.551	0.0019
Последний блок 2 уровень	–0.88	–5.21	0.001	–0.892	–5.594	0.0005
Последний блок 3 уровень	–0.81	–3.85	0.005	–0.8	–3.772	0.0054
Последний блок 4 уровень	–0.94	–7.75	0.000	–0.955	–8.773	0.0000
Последний блок 5 уровень	–0.78	–3.55	0.008	–0.659	–2.475	0.0384
Последний блок 6 уровень	–0.82	–4.02	0.004	–0.702	–2.785	0.0237

показателями эффективности решения задач и вегетативными параметрами.

Стандартное отклонение амплитуды КГР как в первом, так и в последнем блоках обратно коррелировало с показателем “настроение” теста САН после эксперимента (в табл. 1 представлены коэффициенты корреляции и уровни значимости для каждого уровня сложности первого и последнего блоков; средний показатель корреляции по всем уровням всех блоков составил $r = -0.74$, $p = 0.003$), а также разницей в субъективной оценке настроения по САН до и после исследования (см. табл. 1, средний показатель корреляции по всем уровням всех блоков составил $r = -0.76$, $p = 0.003$): чем меньше было стандартное отклонение КГР при решении задач, тем больше увеличивалось настроение у испытуемого после эксперимента.

Значение ЧДД при выполнении самой сложной задачи последнего блока оказалось связанным с правильностью решения задач S ($r = -0.98$, $p = 0.000001$) и D ($r = -0.66$, $p = 0.038$) типов – чем больше правильных ответов давал испытуемый, тем меньше была ЧДД, и наоборот, чем больше ошибок делал

испытуемый в шестом уровне последнего блока, тем больше была ЧДД ($r = 0.86$, $p = 0.001$) (рис. 4 (г)).

Других значимых корреляций, в том числе между успешностью решения задач и изменениями вегетативных показателей, обнаружено не было.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при увеличении сложности задач и при наличии денежного вознаграждения, прогрессивно увеличивающегося в зависимости от правильно решенных заданий, изменения вегетативных и поведенческих параметров имеют различную динамику. В частности, при увеличении сложности задачи линейно возрастает частота морганий и площадь зрачка, а также количество ошибок. При этом другие вегетативные и поведенческие показатели имеют иную динамику в зависимости от уровня сложности. Показатели КГР (а именно среднее значение амплитуды по уровню), вариабельности сердечного ритма и ЧДД меняются линейно только до третьего уровня, после чего регистрируется об-

ратное изменение вегетативных показателей. В частности, ЧДД при решении задач в первом блоке увеличивается вплоть до третьего уровня, а затем значимо снижается вплоть до шестого уровня, показатели variability ЧСС $\ln RMSSD$ и LF/HF уменьшаются до третьего уровня сложности, а затем вновь увеличиваются. Полученные данные свидетельствуют о наличии более сложной вегетативной регуляции при постепенном увеличении сложности задач, которые не объясняются простым увеличением симпатического влияния вегетативной НС на сердечно-сосудистую и дыхательную системы.

Изменение показателей ЭКГ и КГР, отражающих регуляцию со стороны вегетативной нервной системы, действительно имеет неоднозначную динамику и зависит от уровня стресса, в котором находится индивидуум. К примеру, соотношение низкочастотной и высокочастотной мощностей (LF/HF) ЧСС получило широкое признание в качестве инструмента для оценки вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы, где предполагается, что увеличение LF/HF отражает сдвиг в сторону “симпатического доминирования”, а уменьшение этого индекса соответствует “парасимпатическому преобладанию” (Jobbágy et al., 2017). При этом показатели variability сердечного ритма, в частности, различия в длительности интервала RR, уменьшаются при эмоциональном и когнитивном стрессе и при длительном стрессе вследствие хронической боли (Gockel et al., 2008; Rieber et al., 2009), а средняя амплитуда КГР увеличивается вместе со сложностью задания (Kreibig, Gendolla, 2014). Однако некоторые стрессовые ситуации, сопряженные с повышенной тревожностью, агрессией или страхом не приводят к указанным изменениям, что может объясняться как нарушением уровнем адаптации к стрессу, так и специфическими реакциями со стороны вегетативной системы в условиях продолжающегося стресса (Kim et al., 2018; Michels et al., 2013). В частности, тревога, депрессия, ухудшение здоровья и плохой сон были связаны со стойким снижением variability сердечного ритма, в то время как активные попытки совладать со стрессом и использование методов совладения со стрессом связано с увеличением данного показателя, а также с динамикой других показателей вегетативной нервной системы (Burton et al., 2010; Kemp et al., 2010; Martens et al., 2008; Stein et al.,

2005). Другими исследователями было продемонстрировано, что изменения КГР и variability сердечного ритма связаны больше с умением сопереживать положительным эмоциям других людей и не обусловлены стрессовой реакцией как таковой (Fabes et al., 1993). Наши данные также свидетельствуют о нелинейности изменений данных показателей при возрастающем уровне когнитивной и эмоциональной нагрузки.

Результаты корреляционного анализа, проведенного между вегетативными показателями и успешностью решения задач, также позволяют предположить, что противоположенное изменение параметров РД, КГР и variability ЧСС после третьего уровня как-то связано с успешной адаптацией к возрастающему уровню сложности задач. Так, уменьшение ЧДД в последнем экспериментальном блоке отражает успешность решения задач, и чем лучше испытуемые решали задачи в последних блоках, тем сильнее уменьшалась ЧДД.

В то же время линейное увеличение площади зрачка и количества морганий в ответ на увеличение когнитивной и эмоциональной нагрузки свидетельствует об иной регуляции со стороны вегетативной системы на данные параметры при исследуемом уровне сложности задач. Наши результаты повторяют литературные данные, согласно которым при повышении стресса вследствие увеличения когнитивной нагрузки наблюдается расширение зрачка и частоты морганий (Duncko et al., 2007; Jyotsna, Amudha, 2018). Подобные различия между вегетативной регуляцией движений глаза, сердечно-сосудистой и дыхательной систем могут объясняться как физиологическими особенностями регуляции, так и различиями в тех уровнях сложности задач, при которых могут наблюдаться обратные изменения просвета зрачка и частоты морганий. В частности, по некоторым данным, при определенном уровне когнитивной нагрузки происходит урежение частоты морганий (Veltman, Gaillard, 1998). Данный вопрос требует дальнейшего исследования.

Различия между первым и последним блоками также отражали динамику в состоянии испытуемых. К последнему блоку испытуемые решали задачи значительно лучше, что особенно видно для более высоких уровней сложности — время решения и количество ошибок значимо уменьшалось по сравнению с первым блоком. Также менялись и вегета-

тивные показатели: в последнем блоке динамика этих показателей при увеличении уровня сложности становилась более сглаженной. Первый уровень первого блока также имел определенные особенности: во-первых, сопровождался большим количеством ошибок, а во-вторых, большим расширением зрачка по сравнению с первым уровнем последнего блока. Полученные результаты свидетельствуют о том, что последний блок по сравнению с первым у испытуемых вызывал меньший стресс, что может быть объяснено привыканием к заданию. В частности, хорошо известно, что когда человек приступает к какому-то заданию, уровень напряжения всегда выше, чем когда он уже адаптировался в процессе решения заданий (Conrad, 2002; Lazzarini et al., 1979). Однако, несмотря на улучшение в результатах решения задач к последнему блоку в целом, вегетативные показатели, такие как, увеличение частоты морганий, ЧДД и стандартного отклонения амплитуды КГР, свидетельствуют о большем напряжении при решении задач, особенно пятого и шестого уровня. Более того, результаты корреляционного анализа свидетельствуют о том, что увеличение стандартного отклонения КГР сопровождалось снижением настроения после окончания эксперимента. Наблюдаемые вегетативные изменения к концу эксперимента предположительно связаны с ростом когнитивных усилий для решения задач повышающейся сложности. Кроме того, можно предположить, что снижение настроения при больших вегетативных изменениях сопровождалось большими эмоциональными затратами и было связано с мотивацией субъекта. Так, исследования в области перфекционизма выявили, что негативные эмоциональные реакции на ошибки чаще выявляются у субъектов, для которых характерна более высокая мотивация и даже перфекционизм, и чаще сопровождаются более сильным стрессом (Cassidy, 2002; Stoeber, Eisenmann, 2007).

Основным ограничением данной работы является небольшое количество испытуемых ($n = 10$). Данную проблему мы попытались разрешить за счет относительной однородности выборки по психометрическим параметрам, детальным субъективным отчетам и сбору анамнеза.

Эксперименты выполнены на базе Центра коллективного пользования научным оборудованием для функционального картирова-

ния мозга на базе ИВНД и НФ РАН. Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации для ИВНД и НФ РАН на 2021–2023 годы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По мере возрастания сложности когнитивной задачи с первого по шестой уровень наблюдалось постепенное увеличение диаметра зрачка и количества морганий. Увеличение ЧДД и амплитуды КГР и уменьшение показателей $\ln RMSSD$ и LF/HF вплоть до третьего уровня сопровождалось устойчивыми показателями эффективности решения задач, в частности отсутствием динамики количества ошибок. Однако, при дальнейшем увеличении сложности задач наблюдалось значимое увеличение количества ошибок, что сопровождалось, напротив, увеличением показателей $\ln RMSSD$ и LF/HF и уменьшением ЧДД и амплитуды КГР. Более высокий уровень эмоционального и когнитивного напряжения при решении задач пятого и шестого уровней сложности сопровождался увеличением количества ошибок и времени решения задач, а также специфическими изменениями вегетативных показателей.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Государственное задание Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ИВНД и НФ РАН; Программа фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баевский Р.М., Иванов Г.Г., Чирейкин, Л.В., Гаврилушкин А.П., Довгалецкий П.Я., Кукушкин Ю.А., Миронова Т.Ф., Прилуцкий Д.А., Семенов А.В., Федоров В.Ф., Флейшман А.Н. Анализ variabilityности сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем (методические рекомендации). Вестник аритмологии. 2001. 24(6): 86.
- Мартынова О.В., Роик А.О., Иваницкий Г.А. Изменение показателей работы сердечно-сосудистой системы при различных мыслительных операциях. Физиол. чел. 2011. 37(6): 35–41.
- Меркулова Т.Б., Рассказова Е.И. Краткое руководство по клинической сомнологии: учеб. пособие. Под общ. ред. Коврова Г.В. М.: МЕДпресс-информ, 2018. С. 241–243.
- Раудис Ш., Юстицкис В. Закон Йеркса-Додсона: связь между стимулированием и успешностью научения. Вопросы психологии. 2008. 3: 119–126.

- Arsalidou M., Pascual-Leone J., Johnson J.* Misleading cues improve developmental assessment of working memory capacity: the color matching tasks. *Cognitive Development*. 2010. 25(3): 262–277.
- Arsalidou M., Im-Bolter N.* Why parametric measures are critical for understanding typical and atypical cognitive development. *Brain Imaging Behav*. 2017. 11(4): 1214–1224.
- Bachurina V.A., Arsalidou M.* Eye-tracking indices of mental attentional load in children and adults. Когнитивная наука в Москве: новые исследования. Материалы конференции 19 июня 2019 г. М.: Буки Веди, 2019. С. 18–22.
- Bali A., Jaggi A.S.* Clinical experimental stress studies: methods and assessment. *Rev Neurosci*. 2015. 26(5): 555–579.
- Barthelme S.* Eyelinker: Import ASC Files from Eye-Link Eye Trackers. R package version 0.2.1. 2021. <https://CRAN.R-project.org/package=eyelinker>
- Bigliassi M., Karageorghis C.I., Nowicky A.V., Wright M.J., Orgs G.* Effects of auditory distraction on voluntary movements: exploring the underlying mechanisms associated with parallel processing. *Psychological research*. 2018. 82(4): 720–733.
- Biondi B., Palmieri E.A., Lombardi G., Fazio S.* Effects of thyroid hormone on cardiac function—the relative importance of heart rate, loading conditions, and myocardial contractility in the regulation of cardiac performance in human hyperthyroidism. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*. 2002. 87(3): 968–974.
- Burton A.R., Rahman K., Kadota Y., Lloyd A., Vollmer-Conna U.* Reduced heart rate variability predicts poor sleep quality in a case–control study of chronic fatigue syndrome. *Experimental brain research*. 2010. 204(1): 71–78.
- Cassidy T.* Problem-solving style, achievement motivation, psychological distress and response to a simulated emergency. *Counselling Psychology Quarterly*. 2002. 15(4): 325–332.
- Conrad D.L.* Engagement, excitement, anxiety, and fear: Learners' experiences of starting an online course. *The American journal of distance education*. 2002. 16(4): 205–226.
- Corrigan F.M., Fisher J.J., Nutt D.J.* Autonomic dysregulation and the window of tolerance model of the effects of complex emotional trauma. *Journal of psychopharmacology*. 2011. 25(1): 17–25.
- De Morree H.M., Szabó B.M., Rutten G.J., Kop W.J.* Central nervous system involvement in the autonomic responses to psychological distress. *Netherlands Heart Journal*. 2013. 21(2): 64–69.
- Duncko R., Cornwell B., Cui L., Merikangas K.R., Grillon C.* Acute exposure to stress improves performance in trace eyeblink conditioning and spatial learning tasks in healthy men. *Learn Mem*. 2007. 14(5): 329–335.
- Ernst G.* Heart-rate variability—more than heart beats? *Frontiers in public health*. 2017. 5: 240.
- Esco M.R., Flatt A.A.* Ultra-short-term heart rate variability indexes at rest and post-exercise in athletes: evaluating the agreement with accepted recommendations. *Journal of sports science & medicine*. 2014. 13(3): 535.
- Fabes R.A., Eisenberg N., Eisenbud L.* Behavioral and physiological correlates of children's reactions to others in distress. *Developmental psychology*. 1993. 29(4): 655–663.
- Fornasa E., De Felice A., D'Addio G., Insalaco G., Balzano G., Accardo A.* HRV analysis in obstructive sleep apnea syndrome by means of LF/HF ratio and fractal dimension. *European Respiratory Journal*. 2014. 44(Suppl 58).
- Gockel M., Lindholm H., Niemistö L., Hurri H.* Perceived disability but not pain is connected with autonomic nervous function among patients with chronic low back pain. *Journal of rehabilitation medicine*. 2008. 40(5): 355–358.
- Holper L., Seifritz E., Scholkmann F.* Short-term pulse rate variability is better characterized by functional near-infrared spectroscopy than by photoplethysmography. *Journal of biomedical optics*. 2016. 21(9): 091308.
- Iani C., Gopher D., Lavie P.* Effects of task difficulty and invested mental effort on peripheral vasoconstriction. *Psychophysiology*. 2004. 41(5): 789–798.
- Jobbágy Á., Majnár M., Toth L., Nagy P.B.* HRV-based stress level assessment using very short recordings. *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*. 2017. 61(3): 238–245.
- Johns M.W.* A new method for measuring daytime sleepiness: the Epworth sleepiness scale. *Sleep*. 1991. 14(6): 540–545.
- Jyotsna C., Amudha J.* Eye Gaze as an Indicator for Stress Level Analysis in Students. *International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*, 2018. 1588–1593 pp.
- Kemp A.H., Quintana D.S., Gray M.A., Felmingham K.L., Brown K., Gatt J.M.* Impact of depression and antidepressant treatment on heart rate variability: a review and meta-analysis. *Biol Psychiatry*. 2010. 67(11): 1067–1074.
- Khazaei S., Amin M.R., Faghih R.T.* Decoding a Neurofeedback-Modulated Cognitive Arousal State to Investigate Performance Regulation by the Yerkes-Dodson Law. 2021 43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC). – IEEE, 2021. 6551–6557 pp.
- Kim H.G., Cheon E.J., Bai D.S., Lee Y.H., Koo B.H.* Stress and heart rate variability: a meta-analysis and review of the literature. *Psychiatry Investig*. 2018. 15(3): 235–245.
- Kreibig S.D., Gendolla G.H.E.* Autonomic nervous system measurement of emotion in education and achievement settings. *Psychologist*. 2014. 15(2): 142–151.
- Krejtz K.K., Duchowski A.T., Niedzielska A., Biele C., Krejtz I.* Eye tracking cognitive load using pupil diameter and microsaccades with fixed gaze. *PloS one*. 2018. 13(9): e0203629.
- Lazzerini A.J., Cox T., Mackay C.J.* Perceptions of and reactions to stressful situations: The utility of a general anxiety trait. *Br J Soc Clin Psychol*. 1979. 18(4): 363–369.

- Martens E.J., Nyklíček I., Szabó B.M., Kupper N.* Depression and anxiety as predictors of heart rate variability after myocardial infarction. *Psychol Med.* 2008. 38(3): 375–383.
- Michels N., Sioen I., Clays E., De Buyzere M., Ahrens W., Huybrechts I., Vanaelst B., De Henauw S.* Children's heart rate variability as stress indicator: association with reported stress and cortisol. *Biol Psychol.* 2013. 94(2): 433–40.
- Pereira T., Almeida P.R., Cunha J.P.S., Aguiar A.* Heart rate variability metrics for fine-grained stress level assessment. *Comput Methods Programs Biomed.* 2017. 148: 71–80.
- R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2021. URL <https://www.R-project.org/>.
- Rieber N., Betz L., Enck P., Muth E., Nikendei C., Schrauth M., Werner A., Kowalski A., Zipfel S.* Effects of medical training scenarios on heart rate variability and motivation in students and simulated patients. *Med Educ.* 2009. 43(6): 553–556.
- Shaffer F., Ginsberg J.P.* An overview of heart rate variability metrics and norms. *Frontiers in public health.* 2017. 258.
- Shiels H.A., White E.* The Frank–Starling mechanism in vertebrate cardiac myocytes. *J Exp Biol.* 2008. 211(13): 2005–2013.
- Stein P.K., Domitrovich P.P., Huikuri H.V., Kleiger R.E. Cast Investigators.* Traditional and nonlinear heart rate variability are each independently associated with mortality after myocardial infarction. *J Cardiovasc Electrophysiol.* 2005. 16(1): 13–20.
- Stoeber J., Eismann U.* Perfectionism in young musicians: Relations with motivation, effort, achievement, and distress. *Personality and Individual Differences.* 2007. 43(8): 2182–2192.
- Veltman J.A., Gaillard A.W.K.* Physiological workload reactions to increasing levels of task difficulty. *Ergonomics.* 1998. 41(5): 656–669.
- Wang J., Rao H., Wetmore G.S., Furlan P.M., Korczykowski M., Dinges D.F. and Detre J.A.* Perfusion functional MRI reveals cerebral blood flow pattern under psychological stress. *Proceedings of the National Academy of Sciences.* 2005. 102(49): 17804–17809.
- Wheaton B., Montazer S.* Stressors, Stress, and Distress. *A Handbook for the Study of Mental Health: Social Contexts, Theories, and Systems* Eds. Scheid T. & Brown T. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 171–199 pp.

VEGETATIVE AND BEHAVIORAL INDICATORS OF COGNITIVE LOAD IN HEALTHY VOLUNTEERS

G. V. Portnova^{a, b, *}, K. M. Liukovich^a, L. N. Vasilieva^a, and E. I. Alshanskaia^c

^a*Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology RAS, Moscow, Russia*

^b*State Institute of the Russian Language named after A.S. Pushkin, Moscow, Russia*

^c*Department of Psychology, National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia*

*e-mail: caviter@list.ru

Cognitive and emotional stress due to the increase of task complexity leads to the activation of the autonomic nervous system, which in turn can both lead to the higher efficiency of task solving and contribute to the destabilization of the emotional state and a decrease in productivity level. The result of the autonomic nervous system activity depends on the subject's level of stress and motivation, and it attributes to the different ratio of the sympathetic and parasympathetic links in response to the cognitive load. The aim of this study was to investigate the response of various parameters of the autonomic reactions during gradual increase of the task complexity. The parameters included registration of the pupil area and the number of blinks, as well as respiratory recursion, heart rate variability indices and galvanic skin response. The study involved a group of 10 healthy volunteers. The experimental paradigm included six levels of complexity of tasks requiring the active participation of working memory and attention. An increase in the complexity of the task from the first to the sixth level led to a gradual increase in the pupil area and the number of blinks, which corresponds to a uniform increase in the activation of the sympathetic nervous system. An increase in the sympathetic component of the autonomic nervous system regarding the respiratory and cardiovascular systems was observed only up to the third level of complexity, after which the increase in sympathetic influence was not accompanied by the higher efficiency of problem solving. More pronounced dynamics of galvanic skin response when solving problems was associated with a decrease in mood after the study, which indirectly indicates a higher level of emotional stress.

Keywords: autonomic nervous system, eye-tracker, polygraph, heart rate variability, galvanic skin response, pupil size