

ОСОБЕННОСТИ НЕЙРОВЕГЕТАТИВНОЙ И ГУМОРАЛЬНОЙ РЕГУЛЯЦИИ КОГНИТИВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ У ПОДРОСТКОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Адамовская О.Н.,
Ермакова И.В.,
Догадкина С.Б.

ФГБНУ «Институт возрастной физиологии
Российской академии образования»
(119869, г. Москва,
ул. Погодинская, 8, корп. 2, Россия)

Автор, ответственный за переписку:
Ермакова Ирина Владимировна,
e-mail: ermekb1@mail.ru

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Изучение функционального состояния организма подростков при когнитивной деятельности с использованием электронных устройств приобретает большое значение из-за внедрения в образовательный процесс информационно-компьютерных технологий. Выявление особенностей реактивности организма обучающихся при выполнении когнитивной деятельности в цифровой среде будет способствовать как оптимизации обучения, так и здоровьесбережению.

Цель исследования. Изучить вегетативную регуляцию сердечного ритма, электродермальную активность, мозговое кровообращение и уровень кортизола в слюне при выполнении подростками когнитивного теста на электронных устройствах (планшет, ноутбук) и бумажном носителе.

Материалы и методы. Методами анализа вариабельности сердечного ритма, электродермальной активности, реоэнцефалографии и иммуноферментного определения кортизола в слюне обследовано 48 подростков при выполнении когнитивной нагрузки на электронных устройствах.

Результаты. При выполнении подростками когнитивной нагрузки на электронных устройствах происходит изменение показателей вариабельности сердечного ритма, электродермальной активности и мозгового кровообращения. Когнитивная деятельность в цифровой среде вызывает рост симпатических влияний на сердечный ритм при снижении парасимпатической активности, увеличение интегративного показателя кожно-гальванической реакции, повышение тонуса сосудов и снижение интенсивности мозгового кровотока. Каждый четвёртый подросток испытывает упреждающее возбуждение эндокринной системы перед выполнением когнитивного теста. Корреляционный анализ выявил большое количество корреляционных связей между изучаемыми показателями как в исходном состоянии, так и в ходе когнитивной деятельности.

Заключение. Большое количество корреляционных связей как в исходном состоянии, так и при выполнении когнитивного теста между показателями вариабельности сердечного ритма и концентрацией кортизола, параметрами мозгового кровообращения свидетельствует о сохранении жёсткой системы нейровегетативной и гуморальной регуляции сердечного ритма при использовании электронных устройств по сравнению с бумажным носителем.

Ключевые слова: подростки, когнитивная нагрузка, вариабельность сердечного ритма, электродермальная активность, мозговое кровообращение, кортизол

Для цитирования: Адамовская О.Н., Ермакова И.В., Догадкина С.Б. Особенности нейровегетативной и гуморальной регуляции когнитивной деятельности у подростков при использовании электронных устройств. *Acta biomedica scientifica*. 2024; 9(1): 85-95. doi: 10.29413/ABS.2024-9.1.9

Статья поступила: 20.06.2023

Статья принята: 22.01.2024

Статья опубликована: 26.03.2024

FEATURES OF NEUROVEGETATIVE AND HUMORAL REGULATION OF COGNITIVE ACTIVITY IN ADOLESCENTS WHEN USING ELECTRONIC DEVICES

Adamovskaya O.N.,
Ermakova I.V.,
Dogadkina S.B.

Institute of Developmental Physiology,
Russian Academy of Education
(Pogodinskaya str. 8, build. 2,
Moscow 119121, Russian Federation)

Corresponding author:
Irina V. Ermakova,
e-mail: ermek61@mail.ru

ABSTRACT

Background. Studying the functional state of the body of adolescents when they perform cognitive activity using electronic devices is of great importance due to the introduction of information and computer technologies into the educational process. Identifying the characteristics of the reactivity of students' bodies when performing cognitive activities in a digital environment will contribute to both optimization of learning and health protection.

The aim. To study the autonomic regulation of heart rate, electrodermal activity, cerebral circulation and the level of cortisol in saliva when adolescents performed a cognitive test on electronic devices (tablet, laptop) and on paper.

Materials and methods. Using analysis of heart rate variability, electrodermal activity, rheoencephalography and enzyme-linked immunosorbent determination of cortisol in saliva, we examined 48 adolescents while performing a cognitive activity on electronic devices.

Results. When adolescents perform cognitive activity using electronic devices, we can register changes in heart rate variability, electrodermal activity and cerebral circulation. Cognitive activity in a digital environment causes an increase in sympathetic effect on the heart rate with a decrease in parasympathetic activity, an increase in the integrative indicator of galvanic skin response, in vascular tone and a decrease in the cerebral blood flow intensity. One in four adolescents experiences anticipatory stimulation of the endocrine system before taking a cognitive test. Correlation analysis revealed a large number of correlations between the studied indicators both in the initial state and during cognitive activity.

Conclusion. A large number of correlations, both in the initial state and during the cognitive test, between heart rate variability and cortisol concentration, cerebral circulation parameters indicate the preservation of a rigid system of neurovegetative and humoral regulation of heart rate when using electronic devices compared to paper-based media.

Keywords: adolescents, cognitive load, heart rate variability, electrodermal activity, cerebral circulation, cortisol

Received: 20.06.2023
Accepted: 22.01.2024
Published: 26.03.2024

For citation: Adamovskaya O.N., Ermakova I.V., Dogadkina S.B. Features of neurovegetative and humoral regulation of cognitive activity in adolescents when using electronic devices. *Acta biomedica scientifica*. 2024; 9(1): 85-95. doi: 10.29413/ABS.2024-9.1.9

ОБОСНОВАНИЕ

В настоящее время (в 2019–2024 гг.) Министерством просвещения России реализуется федеральный проект «Цифровая образовательная среда», направленный на создание цифровой образовательной среды, в рамках которого происходят развитие и внедрение цифровых сервисов и контента для образовательной деятельности, что подразумевает активное использование электронных устройств (ЭУ) при обучении детей и подростков. Несомненно, применение в образовательном процессе электронных устройств, с одной стороны, повысит интерес, мотивацию и самостоятельность обучающихся [1], а с другой – может оказать потенциально негативное влияние на функциональное состояние организма: вынужденная рабочая поза, напряжение мышц шеи, верхнего плечевого пояса, спины [2, 3], большая нагрузка на зрение [4, 5], повышение интенсивности умственной деятельности, переутомление [6]; т. е. применение электронных средств обучения для организма школьников будет физиологически непросто. Известно, что умственная нагрузка вызывает изменение активности нервной вегетативной и эндокринной систем [7, 8]. Однако сведения о нейровегетативной и гуморальной регуляции когнитивной деятельности у подростков при работе на электронных устройствах практически отсутствуют.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучить вегетативную регуляцию сердечного ритма, электродермальную активность, мозговое кровообращение и уровень кортизола в слюне при выполнении подростками когнитивного теста на электронных устройствах (планшет, ноутбук) и на бумажном носителе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводилось в 2022 г. на базе одной общеобразовательной организации г. Москвы; в нём приняли участие 48 обучающихся (26 мальчиков, 22 девочки) 7-х классов (13–14 лет; средний возраст $13,83 \pm 0,11$ года). Исследование проводилось в первой половине дня (с 9.00 до 14.00 часов), во время наибольшей активности физиологических функций. Критериями исключения были острое инфекционное заболевание или обострение хронического заболевания. До начала обследования родители участников дали письменное информированное согласие на участие их детей в исследовании.

С целью оценки variability сердечного ритма (BCP) проводили регистрацию электрокардиограммы (ЭКГ) с помощью компьютерного кардиографа «Поли-Спектр-8/Е» (Нейрософт, г. Иваново). Регистрацию ЭКГ проводили в положении обследуемого сидя, до предъявления когнитивного задания (исходное состояние) и на 1–5-й, 6–10-й и 11–15-й минутах выполнения теста (нагрузка). Кардиоинтервалограммы изучали методами

временного и спектрального анализа BCP с целью оценки состояния вегетативной нервной системы.

Для оценки BCP использовали показатели временного (среднее значение продолжительности R-R-интервалов (RRNN, normal-to-normal RR intervals), мс; стандартное отклонение величин нормальных R-R-интервалов (SDNN, standard deviation of NN intervals), мс; квадратный корень из среднего квадратов разностей величин последовательных пар интервалов N-N (RMSSD, root mean square of successive RR interval differences), мс; доля последовательных интервалов N-N, различие между которыми превышает 50 мс (pNN50, proportion of NN intervals differing by more than 50 ms), %) и спектрального (общая мощность спектра (TP, total power), мс²; мощность высокочастотных (HF, high frequency), низкочастотных (LF, low frequency) и очень низкочастотных (VLF, very low frequency) колебаний, мс²) анализа. Для оценки баланса отделов вегетативной нервной системы (ВНС) (соотношение симпатических и парасимпатических влияний) использовали отношение LF/HF [9]. Оценка variability сердечного ритма проводилась на 3 этапах выполнения теста (1–5 мин, 6–10 мин и 11–15 мин выполнения теста).

Кожно-гальваническую реакцию (КГР) оценивали с помощью аппаратно-программного комплекса «Дианел-5120» (ООО ЦИТ «Нелиан», Москва), регистрируя электрокожную проводимость на концевых фалангах 4-го и 5-го пальцев правой и левой руки в исходном состоянии и на протяжении 15 мин в ходе выполнения когнитивного задания на электронных устройствах и бумаге. Кожно-гальваническая реакция является объективным показателем уровня активности симпатического отдела вегетативной нервной системы.

Мозговое кровообращение изучали методом реоэнцефалографии (РЭГ) в бифронтальном (F-F) отведении с помощью прибора «Рео-Спектр» (Нейрософт, г. Иваново). Оценку мозгового кровообращения проводили по следующим показателям: а/Т (%) – отношение длительности периода восходящей части волны (с) к длительности всей реоимпульсной волны (Т, с); di (%) – диастолический индекс; АЧП (у. е.) – амплитудно-частотный показатель, который отражает кровоток в единицу времени.

Реакцию эндокринной системы обучающихся на когнитивное задание, выполняемое на различных электронных устройствах и бумажном носителе, оценивали по концентрации кортизола в нестимулированной слюне, которую собирали в пластиковые одноразовые пробирки до и после теста. Пробы слюны до проведения анализа хранили в морозильной камере при температуре -20°C . Оптическую плотность и значения концентрации гормона определяли с помощью набора реагентов фирмы DRG (США) на иммуноферментном анализаторе StatFax 2100 (Awareness Technology, США) и выражали в нг/мл. Все анализы были сделаны в соответствии с протоколом наборов, контрольные показатели были в рамках принятых пределов.

В ходе исследования обучающиеся выполняли тест «таблицы Анфимова» на разных электронных устройствах: ноутбук HP RTL8723BE (HP Inc., США) (экран

15,6 дюйма, разрешение 1366 × 768 пикселей, светодиодная подсветка с технологией LED) и планшет iPad 3 (Apple Inc., США) (экран 9,8 дюйма, разрешение 2048 × 1536 пикселей при 264 ppi, светодиодная подсветка с технологией IPS).

Тест «таблицы Анфимова» – задание, оценивающее умственную работоспособность и используемое для оценки устойчивости, распределения и переключения внимания у детей и подростков. Тест заключался в следующем: на экране электронного устройства испытуемому предъявлялась буквенная таблица, просматривая которую слева направо, нужно находить букву, выделенную цветом в начале строки, отмечая с помощью определённых клавиш клавиатуры или нажимая пальцем на сенсорный экран. Время выполнения задания составляло 15 минут. Контролем служило выполнение теста «таблицы Анфимова» на бумаге, при выполнении которого испытуемые последовательно находили букву и вычёркивали её карандашом/ручкой. Буквы, которые необходимо было отмечать в ходе выполнения теста, были заданы в начале каждой строки.

Все подростки выполняли 15-минутное когнитивное задание «таблицы Анфимова» на ЭУ (планшет, ноутбук) и бумаге (одно исследование в день). Регистрация ЭКГ, РЭГ и КГР осуществлялась до (исходное состояние) и во время выполнения 15-минутного задания. Слюну собирали до и после тестирования.

Статистическую обработку полученных данных проводили с использованием компьютерного пакета программ SPSS 26 (IBM Corp., США). В связи с тем, что подавляющее большинство изучаемых показателей не имели нормального распределения, использовали методы непараметрической статистики с вычислением медианы (Me), нижнего (Q1) и верхнего (Q3) квартилей. Парное сравнение сопряжённых выборок проводили с помощью критерия Уилкоксона, для сравнения независимых выборок использовали критерий Краскела – Уоллиса, критерий Манна – Уитни. Оценку тесноты статистической связи между показателями осуществляли с помощью корреляционного анализа (коэффициент Спирмена). Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

Обследование подростков проводилось в соответствии с решением комитета по биоэтике ФГБНУ «Институт возрастной физиологии Российской академии образования» (протокол № 1 от 17.02.2023).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Статистический анализ не выявил различий изучаемых показателей как реакции вегетативной нервной и эндокринной систем, мозгового кровообращения в исходном состоянии, так и реакции на когнитивную нагрузку (корректирующая проба по таблицам Анфимова), выполняемую мальчиками и девочками на ноутбуке и планшете, поэтому результаты исследований были объединены в одну группу – электронные устройства, и не были разделены по признаку «пол».

Результаты нашего исследования показали, что интенсивность умственной работоспособности (N), т. е. общее количество просмотренных знаков при выполнении теста на электронных устройствах и бумаге, статистически значимо не различалась ($p = 0,652$) (рис. 1). Однако общее количество вычеркнутых (M) и верно выбранных (S) букв было в 1,5 раза больше на бумаге, чем на ЭУ ($p = 0,0001$) (рис. 2).

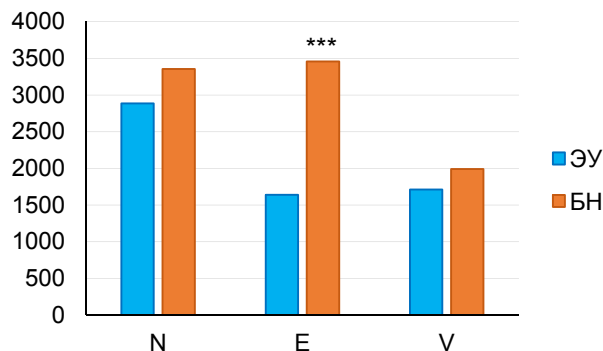


РИС. 1. Показатели умственной работоспособности, представленные в виде медианы: БН – бумажный носитель; N – общее количество просмотренных букв (знаки); E – коэффициент умственной продуктивности (знаки); V – объём переработки зрительной информации

FIG. 1. Indicators of mental performance presented as a median: БН – paper-based media; N – total number of letters viewed (signs); E – coefficient of mental productivity (signs); V – volume of visual information processing

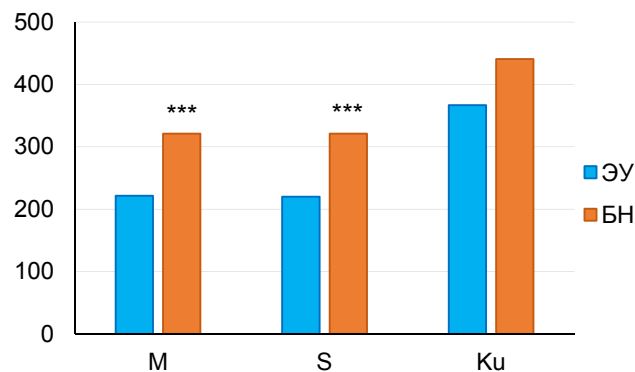


РИС. 2. Показатели умственной работоспособности, представленные в виде медианы: БН – бумажный носитель; M – количество вычеркнутых букв (знаки); S – количество верно выбранных букв (знаки); Ku – устойчивость концентрации внимания (у. е.)

FIG. 2. Indicators of mental performance presented as a median: БН – paper-based media; M – number of crossed out letters (signs); S – number of letters chosen correctly (signs); Ku – attention span (conventional units)

При анализе расчётных показателей умственной работоспособности выявлено, что значение таких показателей, как концентрация внимания (K, %), коэффициент умственной продуктивности (E, знаки) и умственная работоспособ-

ность (Au, знаков/с), в 1,7–2,0 раза выше при работе на бумаге, чем на ЭУ ($p = 0,0001$) (рис. 3). Между тем по ряду таких показателей, как устойчивость концентрации внимания (Ku, у. е.), объём и скорость переработки зрительной информации (V и Q, знаки), статистически значимых различий между ЭУ и бумагой выявлено не было ($p = 0,565–0,652$).

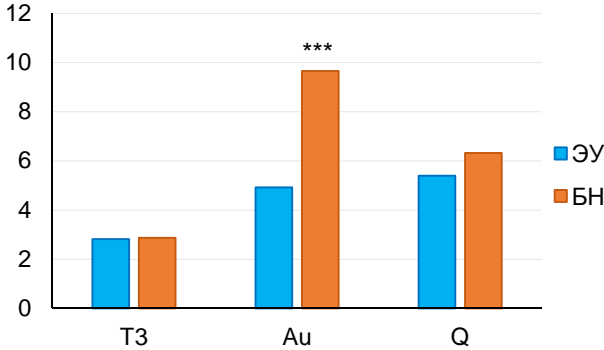


РИС. 3. Показатели умственной работоспособности, представленные в виде медианы: БН – бумажный носитель; Т3 – точность (у. е.); Au – умственная работоспособность (знаков/с); Q – скорость переработки зрительной информации (знаки)

FIG. 3. Indicators of mental performance presented as a median: БН – paper-based media; T3 – accuracy (conventional units), Au – mental performance (signs/sec), Q – visual information processing rate (signs)

ТАБЛИЦА 1
ДИНАМИКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВАРИАбельНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ КОГНИТИВНОГО ТЕСТА НА ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВАХ И БУМАГЕ

Таким образом несмотря на то, что интенсивность умственной работоспособности при работе на ЭУ и бумаге была практически одинаковой, качественные показатели были выше на бумаге как на более привычном носителе информации.

Необходимо отметить, что наиболее выраженные изменения временных и частотных показателей variability ритма сердца отмечались с 11-й по 15-ю минуту работы с таблицами Анфимова независимо от носителя информации.

Выполнение когнитивного задания на электронных устройствах у обучающихся 7-го класса приводило к статистически значимому снижению общей variability сердечного ритма (уменьшение значений TP, RRNN, SDNN), выраженному снижению активности парасимпатического отдела ВНС (уменьшение значений HF nu, HF%) и сдвигу активности вегетативной нервной системы в сторону усиления симпатических влияний (увеличение значений LF nu, LF% и LF/HF). Колебания ВСР в диапазоне VLF-спектра, отражающие нейрогуморальный и метаболический уровень регуляции, статистически значимо не менялись (табл. 1).

При выполнении когнитивного теста на бумаге у подростков происходило повышение показателей низкочастотных колебаний и усиление симпатической активности на 11–15-й минуте выполнения теста (увеличение значений LF nu, LF% и LF/HF).

TABLE 1
DYNAMICS OF HEART RATE VARIABILITY WHEN PERFORMING A COGNITIVE TEST USING ELECTRONIC DEVICES AND PAPER-BASED MEDIA

Показатели	Электронные устройства, Ме (Q1; Q3)			Бумажный носитель, Ме (Q1; Q3)		
	исходное состояние	11–15 мин	p	исходное состояние	11–15 мин	p
ЧСС, уд./мин	85,40 (80,00–96,30)	91,80 (85,15–100,65)	0,001	82,10 (80,30–94,55)	95,00 (86,95–98,55)	0,001
TP, мс ²	3174,0 (1708,5–3922,0)	2201,0 (1492,0–3256,5)	0,010	2590,0 (1862,5–3861,5)	1832,0 (1305,0–3064,5)	0,294
VLF, мс ²	981,0 (469,5–1465,0)	812,0 (553,5–1079,5)	0,100	963,0 (586,5–1490,5)	739,0 (470,5–1332,5)	0,064
HF, мс ²	640,0 (421,5–1116,5)	343,0 (202,0–591,0)	0,000	642,0 (166,5–1050,0)	276,0 (166,0–425,0)	0,133
LF, мс ²	995,0 (577,0–1487,0)	841,0 (599,0–1435,5)	0,406	1005,0 (644,0–1242,0)	791,0 (579,5–1428,0)	0,753
HF nu	40,6 (26,90–50,70)	29,0 (16,75–41,05)	0,000	36,40 (25,40–49,90)	29,2 (20,05–33,00)	0,009
LF nu	59,4 (49,30–73,10)	71,0 (58,95–83,25)	0,000	63,6 (50,10–74,60)	70,8 (67,00–79,95)	0,009
LF/HF, у. е.	1,46 (0,97–2,72)	2,44 (1,43–4,96)	0,000	1,75 (1,02–2,94)	2,43 (2,04–4,08)	0,033
VLF%	33,8 (26,50–42,55)	37,4 (31,15–43,55)	0,532	42,2 (33,40–49,55)	39,5 (31,60–44,15)	0,421
HF%	27,5 (16,35–31,95)	16,6 (9,85–23,55)	0,001	22,7 (13,20–31,80)	18,1 (11,30–21,20)	0,196
LF%	37,9 (29,90–45,45)	45,6 (34,30–51,05)	0,030	36,1 (27,80–42,20)	43,1 (36,40–50,25)	0,039
SDNN, мс	57,0 (42,5–64,0)	45,0 (40,0–55,5)	0,008	50,0 (43,50–64,50)	43,0 (37,00–54,50)	0,135
RMSSD, мс	40,0 (27,0–49,5)	30,0 (21,0–40,0)	0,002	37,0 (23,50–52,00)	25,0 (20,50–35,50)	0,126
pNN50, %	15,7 (4,30–30,8)	6,10 (2,20–17,75)	0,003	37,0 (23,50–52,00)	5,00 (1,85–11,50)	0,001
CV, у. е.	8,00 (6,65–9,10)	7,26 (5,87–8,56)	0,056	7,30 (6,31–8,39)	6,49 (5,93–8,36)	0,507

Примечание. p – статистически значимые различия между исходным состоянием и нагрузкой.

В качестве объективного маркера для оценки активности симпатического отдела ВНС при когнитивной нагрузке используют КГР. При работе на ЭУ (рис. 4а) выявлена статистически значимая динамика изменений амплитуды (АМ, мкА) и интегративного показателя КГР-активности (СА, сНп/мин) левой руки на 11–15-й минуте когнитивной нагрузки по сравнению с исходным состоянием ($p = 0,023$ и $p = 0,015$ соответственно). При работе на бумаге (рис. 4б) происходило статистически значимое увеличение только интегративного показателя КГР-активности (СА, сНп/мин) левой руки ($p = 0,017$); значение амплитуды (АМ, мкА) в исходном состоянии и после когнитивной нагрузки статистически значимо не изменялось ($p = 0,087$).

Результаты исследования мозгового кровообращения при выполнении когнитивного задания на ЭУ и бумаге (табл. 2) показали, что у всех подростков независимо от вида носителя информации отмечается повышение тонуса сосудов в лобном отведении (А_арт., Ом) и снижение интенсивности мозгового кровотока в лобных отведениях (АЧП, у. е.).

Исследование функционального состояния коры надпочечников у подростков в целом по группе по уровню кортизола в слюне показало, что выполнение когни-

тивного задания на ЭУ и бумаге не сопровождалось статистически значимым изменением концентрации кортизола ($p = 0,537$ и $p = 0,311$ соответственно).

Между тем, индивидуальный анализ динамики кортизола позволили выявить два типа реакции: I тип (60 % подростков) – повышение уровня гормона (на 11 % при выполнении нагрузки на ЭУ, 17 % – при выполнении на бумаге); II тип (40 % подростков) – понижение уровня кортизола (на 17 % при выполнении нагрузки на ЭУ, 10 % – при выполнении на бумаге) (рис. 5).

На рисунках 6–8 представлены данные корреляционного анализа показателей variability сердечного ритма, мозгового кровообращения, уровня кортизола и умственной работоспособности при выполнении когнитивного задания на ЭУ и бумаге. Перед работой на электронных устройствах отмечается большее количество корреляционных связей между показателями variability ритма сердца, с одной стороны, и показателями мозгового кровообращения, уровнем кортизола – с другой, по сравнению с исходным состоянием перед работой на бумаге (рис. 6). Наиболее значимые корреляции отмечаются между общей мощностью спектра (TP, мс²) и её составляющими (HF, LF, VLF, мс²) с мозговым кровотоком (АЧП, у. е.) ($r = -0,392-0,410$; $p < 0,05$)

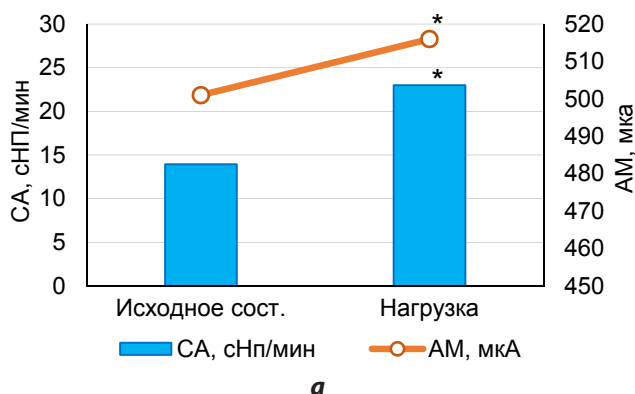


РИС. 4. Показатели кожно-гальванической реакции в исходном состоянии и при выполнении когнитивной нагрузки на электронных устройствах (а) и на бумаге (б): * – различия статистически значимы при $p < 0,05$ по сравнению с исходным состоянием

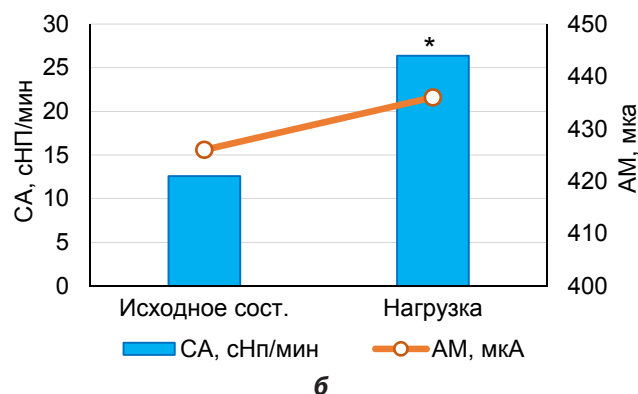


FIG. 4. Galvanic skin response indicators in the initial state and when performing cognitive activity on electronic device (a) and paper-based media (b): * – statistically significant differences at $p < 0.05$ compared to the initial state

ТАБЛИЦА 2
ДИНАМИКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ МОЗГОВОГО КРОВООБРАЩЕНИЯ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ КОГНИТИВНОГО ЗАДАНИЯ НА ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВАХ И БУМАГЕ

Показатели	Электронные устройства, Ме (Q1; Q3)			Бумажный носитель, Ме (Q1; Q3)		
	исходное состояние	11–15 мин	p	исходное состояние	11–15 мин	p
А_арт, Ом (FF ₁)	0,18 (0,15–0,22)	0,13 (0,11–0,17)	0,000	0,15 (0,13–0,19)	0,10 (0,09–0,12)	0,023
АЧП, у. е. (FF ₁)	2,63 (2,10–2,95)	2,10 (1,82–2,43)	0,000	2,38 (1,90–2,61)	1,65 (1,39–1,92)	0,002

Примечание. p – статистически значимое различие между исходным состоянием и нагрузкой.

TABLE 2
DYNAMICS OF CEREBRAL CIRCULATION INDICATORS WHEN PERFORMING COGNITIVE TEST USING ELECTRONIC DEVICES AND PAPER-BASED MEDIA

и тонусом сосудов мелкого калибра (ДИК, %) ($r = 0,419-0,703; p < 0,05-0,01$).

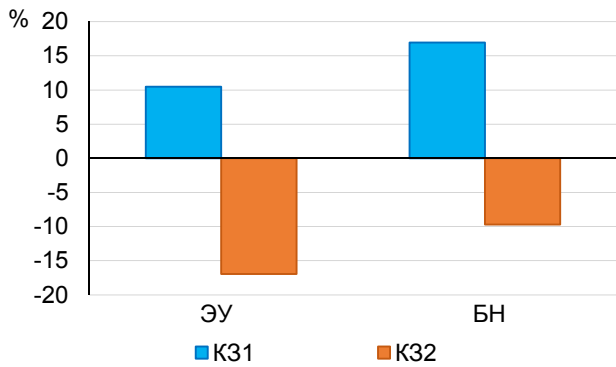


РИС. 5. Динамика прироста концентрации кортизола в зависимости от типа реакции на когнитивное задание, выполняемое на электронных устройствах и бумаге: БН – бумажный носитель; К31 – I тип реакции; К32 – II тип реакции на когнитивное задание

FIG. 5. Dynamics of increase in cortisol concentration depending on the type of reaction to a cognitive task performed on electronic devices and paper-based media: БН – paper-based media; К31 – type 1 of the reaction to a cognitive task; К32 – type 2 of the reaction to a cognitive task

При выполнении теста на ЭУ также отмечается большее количество связей по сравнению с бумажным носителем (рис. 7). Наиболее значимые связи отмечаются между показателями variability ритма сердца и тонусом крупных сосудов (а/RR) ($r = -0,449-0,491; p < 0,01$). Практически все корреляционные связи уровня кортизола с показателями ВСР исчезают, остаётся только отрицательная связь с волнами спектра HF ($r = -0,37; p < 0,05$). Статистически значимые взаимосвязи уровня кортизола с вышеперечисленными показателями как в исходном состоянии, так и в ходе выполнения задания на бумаге отсутствуют.

При выполнении когнитивного задания на ЭУ обнаружены корреляционные связи уровня кортизола с такими показателями умственной работоспособности, как количество верно выбранных букв (S), коэффициент умственной продуктивности (E), концентрация внимания (R), скорость переработки зрительной информации (Q) и умственная работоспособность (Au) ($r = 0,36-0,37; p < 0,05$). При выполнении когнитивного задания на бумаге выявлены тесные корреляционные связи ($r = 0,63-0,66; p < 0,05$) между теми же показателями умственной работоспособности и интегративным показателем КГР-активности (СА левой руки, сНп/мин), отражающим симпатическую активацию вегетативной нервной системы.

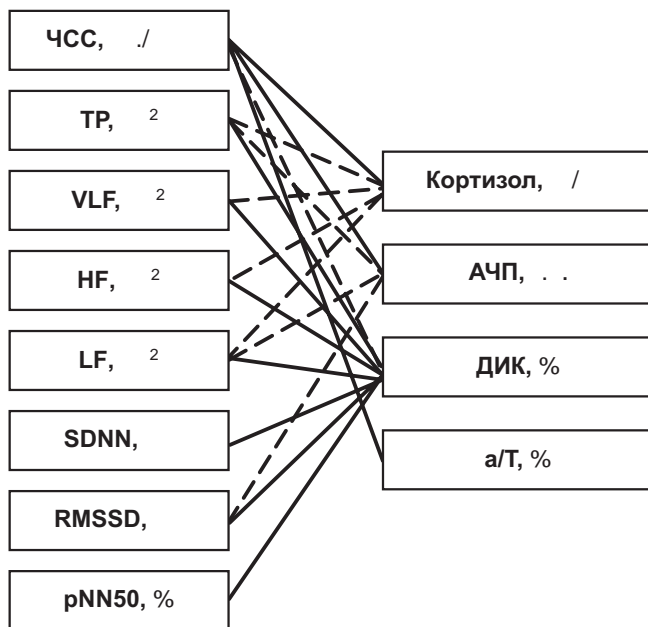


РИС. 6. Корреляционные связи показателей variability сердечного ритма, мозгового кровообращения и уровня кортизола перед выполнением когнитивного задания на электронных устройствах (а) и на бумажном носителе (б) ($p < 0,05$): сплошная линия – прямая связь; пунктирная линия – обратная связь

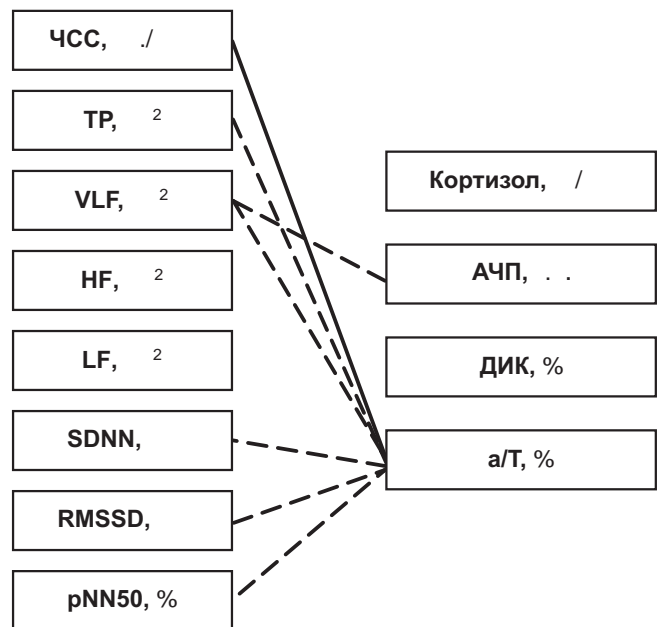


FIG. 6. Correlations of heart rate variability, cerebral circulation and cortisol levels before performing cognitive task on electronic device (а) and on paper-based media (б) ($p < 0,05$): solid line – direct correlation; dotted line – inverse correlation

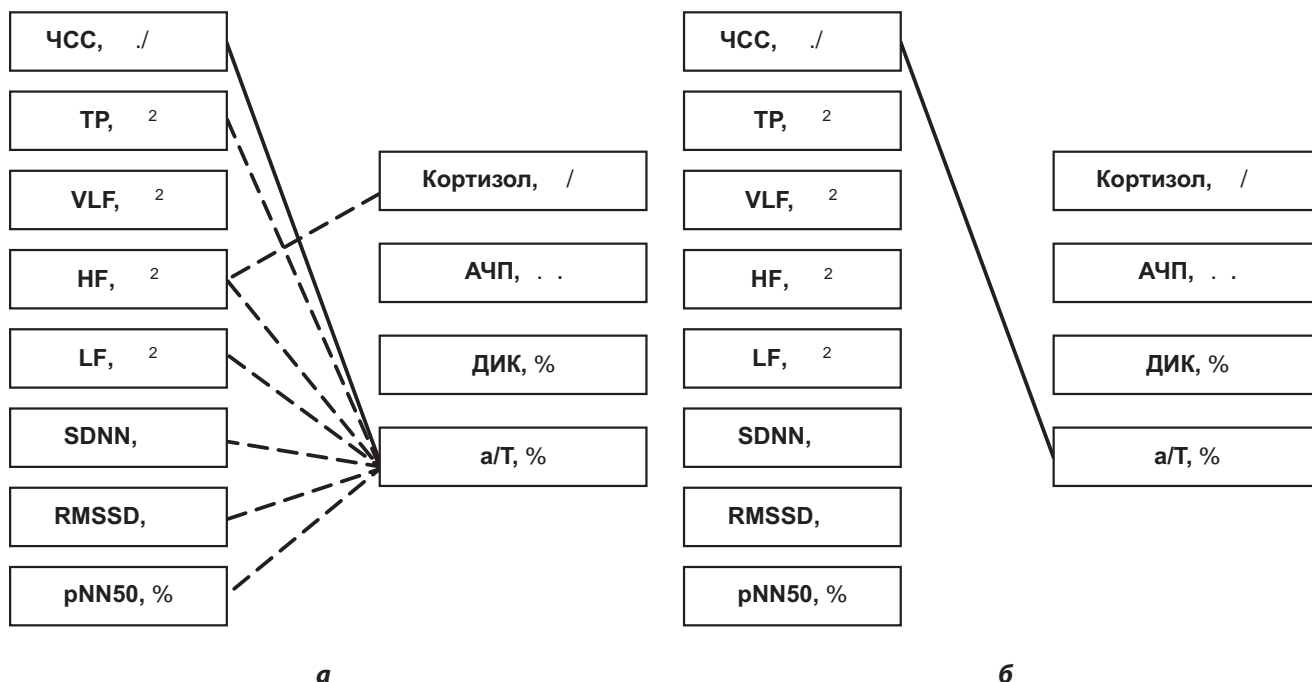


РИС. 7.
Корреляционные связи показателей вариабельности сердечного ритма, мозгового кровообращения и уровня кортизола при выполнении когнитивного задания на электронных устройствах (а) и на бумажном носителе (б) ($p < 0,05$): сплошная линия – прямая связь; пунктирная линия – обратная связь

FIG. 7.
Correlations of heart rate variability, cerebral circulation and cortisol levels when performing cognitive task on electronic device (a) and on paper-based media (b) ($p < 0.05$): solid line – direct correlation; dotted line – inverse correlation

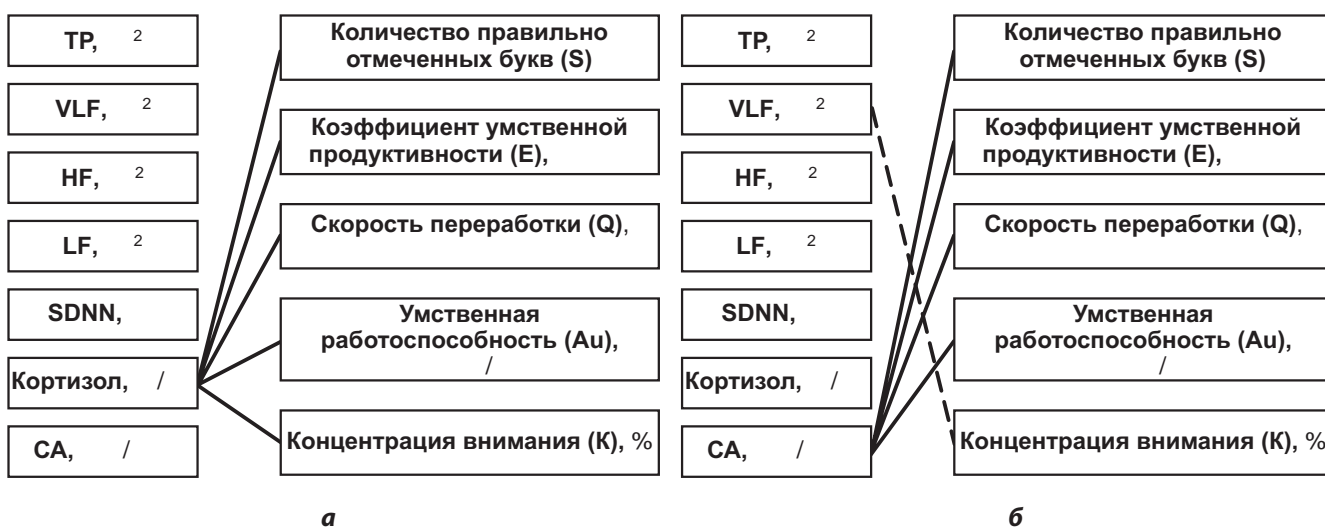


РИС. 8.
Корреляционные связи показателей вариабельности сердечного ритма, мозгового кровообращения и уровня кортизола при выполнении когнитивного задания на электронных устройствах (а) и на бумажном носителе (б) ($p < 0,05$): сплошная линия – прямая связь; пунктирная линия – обратная связь

FIG. 8.
Correlations of heart rate variability, cerebral circulation and cortisol levels when performing cognitive task on electronic device (a) and on paper-based media (b) ($p < 0.05$): solid line – direct correlation; dotted line – inverse correlation

ОБСУЖДЕНИЕ

Перемены, которые мы наблюдаем в современном образовании детей и подростков: внедрение в образовательную среду электронных устройств (компьютеров,

ноутбуков, планшетов и др.), – меняют характер учебной деятельности и влекут за собой необходимость в физиологической оценке оптимизации обучения подрастающего поколения. В связи с этим нами проведено исследование вегетативной регуляции сердечного рит-

ма, электродермальной активности, мозгового кровообращения и уровня кортизола в слюне при выполнении подростками когнитивного теста (таблицы Анфимова) на электронных устройствах (планшет, ноутбук) и бумажном носителе.

По данным исследования ФГБНУ «Институт возрастной физиологии Российской академии образования», проведённого в 2019 и 2022 годах, продолжительность непрерывного использования компьютера на уроке в 7-х классах (13,8 мин) и совокупное время использования электронных средств в день на уроках (38 мин) не превышают нормативных значений, разрешённых «Санитарно-эпидемиологическими требованиями к организациям воспитания и обучения, отдыха и оздоровления детей и молодёжи» [10]. Таким образом, в нашем исследовании 15-минутная длительность выполнения когнитивного теста подростками не превышала допустимых значений.

Результаты исследования показали, что умственная работоспособность (общее количество вычеркнутых и верно выбранных букв, концентрация внимания, коэффициент умственной продуктивности, умственная работоспособность) была в 1,5–2,0 раза выше при работе на бумаге, чем на ЭУ. Из литературы известно, что дети и подростки школьного возраста лучше решают математические задачи, читают и выполняют тесты на бумаге, чем на электронных устройствах [11–14], т. е. большинство исследователей сходятся во мнении, что при восприятии и обработке информации первенство принадлежит традиционному носителю информации. Большое количество ошибок, которые допускают подростки при работе на ЭУ, может быть обусловлено разным углом зрения, под которым субъект смотрит на вертикальный экран ноутбука и/или на горизонтально расположенный бланк с заданием на рабочем столе [15]. Кроме того, выполнение заданий на компьютере повышает нагрузку на системы, которые участвуют в обработке информации [16], что также может сказываться на умственной работоспособности.

Выполнение когнитивного задания на электронных устройствах у обучающихся 7-го класса вызывало снижение общей variability сердечного ритма и парасимпатической активности, усиление симпатического влияния ВНС. В исследовании L. Mugiind и соавт. (2018) [17] также наблюдали снижение тонуса блуждающего нерва у детей 10–12 лет при выполнении задания, аналогичного тесту «таблицы Анфимова». Известно, что быстрое снижение парасимпатической активности в ответ на факторы внешней среды приводит к эффективной мобилизации энергии и оперативному возвращению в состояние покоя [18], что свидетельствует о «парасимпатической гибкости» [19].

В ходе индивидуального анализа выявили два типа эндокринной реакции на когнитивную нагрузку: повышение или понижение уровня кортизола. В нашем исследовании у каждого четвёртого подростка концентрация кортизола в исходном состоянии была выше, чем после когнитивной нагрузки. В этом случае говорят об упреждающем возбуждении эндокринной системы [20], ко-

торая проявляется повышенным уровнем кортизола у взрослых лиц перед экзаменом [21], у детей перед поступлением в школу [22], что может быть связано с недостаточной регуляторной способностью [23]. Вероятно, когнитивная деятельность в цифровой среде для некоторых подростков была более стрессовой, чем традиционное тестирование на бумаге, поэтому их эндокринная система активизировалась уже до когнитивной нагрузки.

С помощью корреляционного анализа выявили большое количество корреляционных связей между показателями variability ритма сердца с параметрами мозгового кровообращения, уровнем кортизола перед работой на электронных устройствах. Согласно теории функциональных систем П.К. Анохина, для достижения полезного приспособительного результата происходит координированное взаимодействие отдельных физиологических систем. Другими словами, адаптационный потенциал обеспечивается комплексом изменений нескольких физиологических систем организма [24].

Наличие статистически значимых корреляционных связей между общей мощностью спектра и её составляющими с мозговым кровотоком (АЧП) и тонусом сосудов мелкого калибра (ДИК) в исходном состоянии свидетельствует о необходимости поддержания нормального кровоснабжения нервной ткани, при котором происходит снижение тонического напряжения церебральных артерий малого калибра, без вовлечения крупных сосудов, что является проявлением ауторегуляции мозгового кровотока [25]. Существование взаимосвязей между показателями вегетативной нервной системы и уровнем кортизола свидетельствует о более генерализованной реакции с вовлечением не только вегетативной, но и гуморальной регуляции в ситуации ожидания перед выполнением теста на электронных устройствах.

Изменение количества и направленности взаимосвязей между различными показателями организма характеризует протекание адаптационных процессов лучше, чем абсолютные значения этих параметров. Количество связей между изучаемыми параметрами в ходе когнитивной деятельности уменьшилось, однако при выполнении теста на ЭУ их число больше по сравнению с бумажным носителем. Наиболее значимые связи отмечаются между показателями variability сердечного ритма и тонусом крупных сосудов (а/Т, %). Повышенная потребность мозга в кислороде удовлетворяется главным образом за счёт увеличения кровотока, которое обусловлено снижением тонуса крупных сосудов [26]. Отрицательная связь уровня кортизола с показателями парасимпатической активности ВНС при работе на ЭУ может свидетельствовать о мобилизации резервов организма подростков в ходе адаптации к когнитивной деятельности. Такая взаимозависимость была обнаружена у подростков, публично выступающих перед незнакомой аудиторией [27].

При выполнении когнитивного задания на ЭУ были обнаружены корреляционные связи уровня кортизола с показателями умственной работоспособности. Это объясняется тем, что кортизол в ситуации от лёгкого до умеренного стресса оказывает благотворное вли-

яние на организм [28], увеличивает подвижность нервных процессов, усиливает работоспособность головного мозга [29], т. е. умеренное и непродолжительное повышение уровня кортизола способствует улучшению когнитивных функций, в нашем случае – повышению умственной работоспособности. При выполнении когнитивного теста на бумаге выявлена положительная связь между теми же показателями умственной работоспособности и симпатической активацией ВНС (по данным КГР), свидетельствующая об обеспечении когнитивных функций симпатической регуляцией [30].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование позволило выявить, что умственная работоспособность, оцениваемая по таким показателям, как общее количество вычеркнутых и верно выбранных букв, концентрация внимания, коэффициент умственной продуктивности, умственная работоспособность в 1,5–2,0 раза выше при работе на бумаге, чем на ЭУ, т. е. когнитивная деятельность при выполнении теста на привычном бумажном носителе информации является более продуктивной. При работе на электронных устройствах происходит значимое снижение парасимпатической (по данным ВСР) и увеличение симпатической активности (по данным ВСР и КГР); при работе на бумажном носителе эти физиологические изменения менее выражены. При когнитивной деятельности независимо от вида носителя информации отмечается снижение артериального кровотока и повышение тонуса сосудов в лобном отведении. Наличие большего количества корреляционных связей как в исходном состоянии, так и при выполнении когнитивного теста между показателями ВСР, с одной стороны, и концентрацией кортизола и показателями мозгового кровообращения, с другой, свидетельствует о сохранении жёсткой системы нейровегетативной и гуморальной регуляции сердечного ритма при использовании электронных устройств по сравнению с бумагой. Это может свидетельствовать о напряжении адаптации организма обучающихся 13–14 лет при когнитивной деятельности в цифровой среде.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы данной статьи сообщают об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Прудникова Т.А., Посакалова Т.А. Зарубежный опыт применения информационно-коммуникационных технологий в целях повышения учебной мотивации. *Современная зарубежная психология*. 2019; 8(2): 67-82. [Prudnikova TA, Poskakalova TA. The experience of application of information and communication technologies (ICTS) as a tool to enhance learning motivation. *Journal of Modern Foreign Psychology*. 2019; 8(2): 67-82. (In Russ.)]. doi: 10.17759/jmfp.2019080207
2. Queiroz LB, Lourenco B, Silva LEV, Lourenco DMR, Silva CA. Musculoskeletal pain and musculoskeletal syndromes in adolescents are related to electronic devices. *J Pediatr (Rio J)*. 2018; 94(6): 673-679. doi: 10.1016/j.jpmed.2017.09.006
3. Nastri MMF, Lourenço B, Queiroz LB, da Silva LEV, Lourenço DMR, Castro APBM, et al. Idiopathic musculoskeletal pain, musculoskeletal pain syndromes, and use of electronic devices in adolescents with asthma *J Pediatr (Rio J)*. 2022; 98(3): 270-275. doi: 10.1016/j.jpmed.2021.06.002
4. Ichhpujani P, Singh RB, Foulsham W, Thakur S, Lamba AS. Visual implications of digital device usage in school children: A cross-sectional study. *BMC Ophthalmology*. 2019; 19(1): 76. doi: 10.1186/s12886-019-1082-5
5. Maharjan U, Rijal S, Jnawali A, Sitaula S, Bhattarai S, Shrestha GB. Binocular vision findings in normally-sighted school aged children who used digital devices. *PLoS One*. 2022; 17(4): e0266068. doi: 10.1371/journal.pone.0266068
6. Александрова И.Э. Гигиенические принципы и технология обеспечения безопасных для здоровья школьников условий обучения в цифровой образовательной среде. *Вопросы школьной и университетской медицины и здоровья*. 2018; 3: 23-33. [Aleksandrova IE. Hygienic principles and technology to ensure safety for health of pupils conditions of training in a digital educational environment. *Problems of School and University Medicine and Health*. 2018; 3: 23-33. (In Russ.)].
7. Trico D, Fanfani A, Varocchi F, Bernini G. Endocrine and haemodynamic stress responses to an arithmetic cognitive challenge. *Neuro Endocrinology Letters*. 2017; 38(3): 182-186.
8. Held J, Višlā A, Wolfer C, Messlerli-Bürge N, Flückiger C. Heart rate variability change during a stressful cognitive task in individuals with anxiety and control participants. *BMC Psychol*. 2021; 9(1): 44. doi: 10.1186/s40359-021-00551-4
9. Shiga K, Izumi K, Minato K, Sugio T, Yoshimura M, Kitazawa M, et al. Subjective well-being and month-long LF/HF ratio among deskworkers. *PLoS One*. 2021; 16(9): e0257062. doi: 10.1371/journal.pone.0257062
10. Постановление «Об утверждении санитарных правил СП 2.4.3648-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к организациям воспитания и обучения, отдыха и оздоровления детей и молодежи». М.; 2020. [Decree "On the approval of sanitary rules SP 2.4.3648-20 "Sanitary and epidemiological requirements for organizations of education and training, recreation and health improvement for children and youth". Moscow; 2020. (In Russ.)]. URL: https://www.rospotrebnadzor.ru/files/news/SP2.4.3648-20_deti.pdf [дата доступа: 10.06.2023].
11. Støle H, Mangen A, Schwippert K. Assessing children's reading comprehension on paper and screen: A mode-effect study. *Comput Educ*. 2020; 151: 103861. doi: 10.1016/j.compedu.2020.103861
12. McClelland T, Cuevas J. A comparison of computer based testing and paper and pencil testing in mathematics assessment. *Online J New Horizons Educ*. 2020; 10(2): 78-89.
13. Pengelley J. *A testing load: Comparing cognitive load in computer and paper-based testing*. Perth; 2022.
14. DiCarlo CF, Deris AR, Deris TP. mLearning versus paper and pencil practice for telling time: Impact for attention and ac-

curacy. *J Behav Educ.* 2023; 32(1): 127-145. doi: 10.1007/s10864-021-09442-5

15. Bailey SKT, Neigel AR, Dhanani LY, Sims VK. Establishing measurement equivalence across computer- and paper-based tests of spatial cognition. *Hum Factors.* 2018; 60(3): 340-350. doi: 10.1177/0018720817747731

16. Carpenter R, Alloway T. Computer versus paper-based testing: Are they equivalent when it comes to working memory? *J Psychoeduc Assess.* 2019; 37(3): 382-394. doi: 10.1177/0734282918761496

17. Mygind L, Stevenson MP, Leibst LS, Konvalinka I, Bentzen P. Stress response and cognitive performance modulation in classroom versus natural environments: A quasi-experimental pilot study with children. *Int J Environ Res Public Health.* 2018; 15(6): 1098. doi: 10.3390/ijerph15061098

18. Porges SW. The polyvagal perspective. *Biol Psychol.* 2007; 74(2): 116-143.

19. Shakiba N, Lynch SF, Propper CB, Mills-Koonce WR, Wagner NJ. Vagal flexibility moderates the links between observed sensitive caregiving in infancy and externalizing behavior problems in middle childhood. *Res Child Adolesc Psychopathol.* 2023; 51(10): 1453-1464. doi: 10.1007/s10802-023-01088-3

20. Roubinov DS, Boyce WT, Lee MR, Bush NR. Evidence for discrete profiles of children's physiological activity across three neurobiological system and their transitions over time. *Dev Sci.* 2021; 24(1): e12989. doi: 10.1111/desc.12989

21. Beltzer E. An ecological approach for investigations of the anticipatory cortisol stress response. *Biol Psychol.* 2022; 175: 108428. doi: 10.1016/j.biopsycho.2022.108428

22. Leblond M, Parent S, Castellanos-Ryan N, Lupien SJ, Fraser WD, Séguin JR. Transition from preschool to school: Children's pattern of change in morning cortisol concentration. *Psychoneuroendocrinol.* 2022; 140: 105724. doi: 10.1016/j.psyneuen.2022.105724

23. Gunnar MR, Wewerka S, Frenn K, Long JD, Griggs C. Developmental changes in hypothalamus-pituitary-adrenal activity over the transition to adolescence: Normative changes and associations with puberty. *Dev Psychopathol.* 2009; 21(1): 69-85. doi: 10.1017/s0954579409000054

24. Варич Л.А., Казин Э.М., Немолочная Н.В., Тарасова О.Л., Бедарева А.В., Васильченко И.Л. Возрастно-половые и типоло-

гические особенности вегетативного, гормонального и иммунного статуса старших подростков. *Физиология человека.* 2020; 46(5): 60-70. [Varich LA, Kazin EM, Nemolochnaya NV, Tarasova OL, Bedareva AV, Vasilchenko IL. Age-sex and typological features of vegetative, hormonal and immune status of older adolescents. *Human Physiology.* 2020; 46(5): 513-521. (In Russ.)]. doi: 10.31857/S013116462004013X

25. Бабианц А.Я., Хананашвили Я.А. Мозговое кровообращение: физиологические аспекты и современные методы исследования. *Журнал фундаментальной медицины и биологии.* 2018; 3: 46-54. [Babiyants AY, Khananashvili YA. Cerebral circulation: Physiological aspects and modern research methods. *Journal of Fundamental Medicine and Biology.* 2018; 3: 46-54. (In Russ.)].

26. Ozturk ED, Tan CO. Human cerebrovascular function in health and disease: Insights from integrative approaches. *Review J Physiol Anthropol.* 2018; 37(1): 4. doi: 10.1186/s40101-018-0164-z

27. Stam JV, Kallen VL, Westenberg PM. Associations between autonomic and endocrine reactivity to stress in adolescence: Related to the development of anxiety? *Healthcare.* 2023; 11(6): 869. doi: 10.3390/healthcare11060869

28. Sapolsky RM. Stress and the brain: Individual variability and the inverted-U. *Nat Neurosci.* 2015; 18(10): 1344-1346. doi: 10.1038/nn.4109

29. Варич Л.А., Федоров А.И., Немолочная Н.В., Блинова Н.Г. Взаимосвязь психофизиологических характеристик и уровня кортизола подростков, обучающихся в условиях лицея-интерната. *Вестник Новосибирского государственного педагогического университета.* 2018; 8(5): 230-244. [Varich LA, Fedorov AI, Nemolochnaya NV, Blinova NG. Correlation between psychophysiological characteristics and a cortizole level in boarding school adolescents. *Novosibirsk State Pedagogical University Bulletin.* 2018; 8(5): 230-244. (In Russ.)]. doi: 10.15293/2226-3365.1805.14

30. Вецлер М.В., Черкасова В.Г., Муравьев С.В., Кулеш А.М., Чайников П.Н., Соломатина Н.В., и др. Особенности и взаимосвязь когнитивных функций и вегетативной регуляции у практически здоровых лиц молодого возраста. *Врач-аспирант.* 2018; 87(2): 11-18. [Wetzler MV, Cherkasova VG, Muravyev SV, Kulesh AM, Chainikov PN, Solomatina NV, et al. Features and correlation of cognitive function and autonomic regulation in healthy young adults. *Postgraduate Doctor.* 2018; 87(2): 11-18. (In Russ.)].

Сведения об авторах

Адамовская Оксана Николаевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории комплексных исследований процессов адаптации, ФГБНУ «Институт возрастной физиологии Российской академии образования», e-mail: krysuyk-19@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0197-3379>

Ермакова Ирина Владимировна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории комплексных исследований процессов адаптации, ФГБНУ «Институт возрастной физиологии Российской академии образования», e-mail: ermek61@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7430-4849>

Догадкина Светлана Борисовна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории комплексных исследований процессов адаптации, ФГБНУ «Институт возрастной физиологии Российской академии образования», e-mail: almanac@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7387-9998>

Information about the authors

Oksana N. Adamovskaya – Cand. Sc. (Biol.), Senior Research Officer at the Laboratory of Complex Studies of Adaptation Processes, Institute of Developmental Physiology, Russian Academy of Education, e-mail: krysuyk-19@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0197-3379>

Irina V. Ermakova – Cand. Sc. (Biol.), Senior Research Officer at the Laboratory of Complex Studies of Adaptation Processes, Institute of Developmental Physiology, Russian Academy of Education, e-mail: ermek61@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7430-4849>

Svetlana B. Dogadkina – Cand. Sc. (Biol.), Senior Research Officer at the Laboratory of Complex Studies of Adaptation Processes, Institute of Developmental Physiology, Russian Academy of Education, e-mail: almanac@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7387-9998>