



ТИПОЛОГИЯ ВЕГЕТАТИВНОЙ АДАПТАЦИИ К КОГНИТИВНОЙ НАГРУЗКЕ ПО ДИНАМИКЕ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА

БОДРОВ И.Г.*, Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный, Россия,
e-mail: igor.shev4@gmail.com

ШИШЕЛОВА А.Ю.**, Московский физико-технический институт (государственный университет); Российский национальный исследовательский медицинский университет (ГБОУ ВПО РНИМУ имени Н.И. Пирогова); Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва, Россия,
e-mail: ihna_ann@mail.ru

АЛИЕВ Р.Р.***, Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН; Московский физико-технический институт (государственный университет); НИИ Кардиологии Федеральный научно-клинический центр ФМБА, Москва, Россия,
e-mail: rubaliev@gmail.com

Исследованы особенности динамики вариабельности сердечного ритма при решении когнитивных задач. У добровольцев проводили оценку функционального состояния по показателям сенсомоторных реакций, а затем регистрацию кардиоинтервалов до, во время и после решения задач. При анализе сердечного ритма выявлено два типа вегетативной адаптации к когнитивной деятельности: первый характеризуется снижением индекса напряжения (по Баевскому, 1984) и увеличением вариабельности сердечного ритма во время решения задач, наряду с увеличением суммарной спектральной мощности регуляторных влияний на ритм сердца; второй — большей вариабельностью ритма сердца, более высокой мощностью регуляторных влияний перед нагрузкой и увеличением индекса напряжения во время нагрузки при отсутствии других значимых изменений. Для данных типов вегетативной адаптации выявлены различные корреляционные связи между показателями сенсомоторных реакций и вариабельности сердечного ритма.

Ключевые слова: вариабельность сердечного ритма, когнитивная нагрузка, индекс напряжения регуляторных систем, адаптация.

Для цитаты:

Бодров И.Г., Шишелова А.Ю., Алиев Р.Р. Типология вегетативной адаптации к когнитивной нагрузке по динамике вариабельности сердечного ритма // Экспериментальная психология. 2018. Т. 11. № 3. С. 78—93. doi:10.17759/exppsy.2018110306

* **Бодров И.Г.** Аспирант, младший научный сотрудник лаборатории физиологии человека, Московский физико-технический институт (государственный университет). E-mail: igor.shev4@gmail.com

** **Шишелова А.Ю.** Кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории физиологии человека, Московский физико-технический институт (государственный университет); доцент кафедры физиологии, Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова; старший научный сотрудник лаборатории нейроонтогенеза, Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН. E-mail: ihna_ann@mail.ru

*** **Алиев Р.Р.** Доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН; заведующий лабораторией электрофизиологии, профессор кафедры вычислительной математики, Московский физико-технический институт (государственный университет); заведующий отделом экспериментальной кардиологии, НИИ Кардиологии Федеральный научно-клинический центр ФМБА. E-mail: rubaliev@gmail.com



Введение

Успешность умственной, когнитивной деятельности во многом зависит от условий кровоснабжения и возбудимости головного мозга. Объемная скорость мозгового кровотока у здорового человека в значительной степени определяется сердечным выбросом (Ritz et al., 2013). Регуляция работы сердца тесно сопряжена с работой различных нейрогуморальных контуров, поддерживающих ряд констант крови (артериального давления, насыщения крови кислородом и др.) и обеспечивающих адаптацию организма к стрессовым факторам. Активность таких контуров проявляется в вариабельности сердечного ритма (ВСР) (Баевский и др., 2001; Котельников и др., 2002), что отражает процессы саморегуляции различных гомеостатических функциональных систем и способность к адаптации во время нагрузок (McCraty, Shaffer, 2015). Ведущий уровень центрального контура регуляции сердечного ритма включает механизмы коркового контроля (Баевский и др., 2001; Thayer, Lane, 2009). С другой стороны, афферентация от рецепторов висцеральных контуров оказывает влияние на активность коры головного мозга. Имеются данные о связи кардиосинхронной висцеральной афферентации с электрофизиологическими проявлениями мозговой деятельности (ЭЭГ, вызванными потенциалами) (Каплан, Шишкин, 1992). Проблема проявления нейровисцерального взаимодействия в динамике ВСР при когнитивной деятельности окончательно не решена и продолжает привлекать внимание исследователей (Каплан, Шишкин, 1992; Мартынова и др., 2011; Jennings et al., 2015; Thayer, Lane, 2009). Опубликованные данные об изменениях ВСР при когнитивной или информационной нагрузке разноречивы: во время решения умственных задач может возникать как снижение, так и увеличение вариабельности (Бань, Загородный, 2010; Данилова, Астафьев, 1999); в одних работах выявлена положительная, в других — отрицательная связь между вариабельностью ритма сердца и успешностью когнитивной деятельности (Джебраилова и др., 2013; Elliot et al., 2011; Stenfors et al., 2016; Tsunoda et al., 2016). Исходя из межиндивидуальных различий тонической активности автономной (вегетативной) нервной системы и ее влияния на ритм сердца (Шлык, Сапожникова, 2008; Takada et al., 2009), логично допустить наличие нескольких типов вегетативной адаптации к умственному труду. Существует несколько подходов к классификации вегетативного управления использованием показателей ВСР в покое и при функциональных пробах: исходя из соотношения активности симпатического и парасимпатического отделов (Ларионова, Викулов, 2005; Ноздрачев и др., 1991) или преобладания центрального или автономного контура регуляции ритма сердца (Шлык, Сапожникова, 2008; 2012). Однако в литературе представлено небольшое число исследований, в которых классификация вегетативных механизмов адаптации основана на динамике перестроек вегетативной регуляции сердечного ритма во время умственной деятельности (Данилова и др., 1994; Ларионова, Викулов, 2005). На наш взгляд, оценка динамических изменений при проведении обследования с учетом наличия ориентировочной реакции в начале и смены мотивационного состояния после выполнения когнитивных тестов дает более полное представление об индивидуальных особенностях адаптации к мыслительной деятельности. Задачи настоящей работы состояли в следующем: 1) классификация способов вегетативной адаптации к когнитивной нагрузке с учетом динамики регуляции сердечного ритма, 2) выявление особенностей изменений вариабельности сердечного ритма во время когнитивной деятельности и их связи с показателями функционального состояния у лиц выделенных нами типов.



Метод

Обследовано 24 здоровых добровольцев-правшей (11 мужчин, 13 женщин) в возрасте 18–34 года, средний возраст — 21 ± 0.7 лет (медиана возраста: 22 года). Исследование начинали с опроса исследуемого для оценки его физического состояния (субъективного ощущения бодрости, отсутствия голода, усталости, боли, сонливости), статуса здоровья (отсутствия неврологических расстройств и нескорректированных нарушений остроты зрения). В дальнейшем обследовании участвовали испытуемые, не испытывавшие физического и психического дискомфорта, не имевшие неврологических заболеваний и регулярных интенсивных спортивных тренировок. Далее регистрировали ЭКГ (I отведение, 3 минуты), затем психофизиологические показатели функционального состояния. Регистрацию всех данных выполняли с помощью диагностического комплекса «Психотест» (Нейрософт, Иваново) в положении сидя, с открытыми глазами, в тихой обстановке. Использовали методики: теппинг-тест, выполнение простой зрительно-моторной реакции, зрительно-моторной реакции выбора, реакции на движущийся объект. Теппинг-тест состоял в быстром нанесении постукивающих ударов карандашом-датчиком в течение 30 с. Анализировали среднюю частоту ударов за пятисекундные интервалы теста и коэффициент утомления, равный отношению разности числа точек в первом и последнем интервалах к числу точек в первом интервале. При выполнении простой зрительно-моторной реакции от исследуемого требовалось максимально быстро нажать на кнопку пульта при вспышке красного цвета. При выполнении реакции выбора требовалось максимально быстро нажать на одну кнопку пульта при вспышке красного цвета и на другую кнопку при вспышке зеленого цвета. В этих тестах регистрировали латентный период от появления вспышки до нажатия на кнопку (время реакции) и число ошибок (преждевременных нажатий кнопки и пропусков сигнала). Интервалы времени между предъявлениями — равно распределенные случайные величины в диапазоне от 800 до 2000 мс (для простой реакции) или до 2500 мс (для реакции выбора). При выполнении задачи на отслеживание движущегося объекта от испытуемого требовалось максимально быстро нажать на кнопку пульта при совмещении движущегося с угловой скоростью 180 гр/с сектора круга на экране монитора с линией-маркером. Между предъявлениями не было временных промежутков, в каждой пробе положение начала сектора и линии-маркера было новым. Анализировали долю точных реакций (правильного совмещения с маркером), опережающих и запаздывающих реакций. Во всех зрительно-моторных тестах было по 20 предъявлений стимулов.

Далее в течение 30 мин исследуемому устанавливали ЭЭГ-электроды и производили регистрацию ЭЭГ в положении сидя, в покое, с закрытыми и открытыми глазами (в данной работе данные ЭЭГ не использовали). После этого исследуемый выполнял когнитивные задания в виде решения пространственно-образных, логических и арифметических задач. Задачи предъявляли на бумажном носителе, поочередно (по 10 задач каждого вида, сопоставимой сложности). При решении пространственно-образной задачи требовалось сравнить две пространственные фигуры, видимые под разными углами, и решить, одинаковы ли они. Логическая задача представляла собой оценку некоего высказывания на основании предложенных вариантов истинных и ложных логических следствий из него. Арифметические задачи состояли из последовательности нескольких арифметических действий, которые требовалось проделать в уме (пример: $(13 \cdot 5 + 21) \cdot 5 = ?$). Во время решения задач и через одну минуту после окончания когнитивной нагрузки осуществляли запись ЭКГ в течение трех минут.

Для оценки variability сердечного ритма анализировали следующие показатели: а) *статистические*: ЧСС (уд./мин), коэффициент вариации (КВ) — отношение среднего



квадратичного отклонения к среднему значению в выборке кардиоинтервалов (%); долю (%) последовательных кардиоинтервалов, различие между которыми превышает 50 мс (показатель $pNN50$ (Malik et al., 1996); б) *геометрические*: индекс вегетативного равновесия (ИВР), равный отношению амплитуды моды гистограммы распределения кардиоинтервалов к вариационному размаху (разности между максимальным и минимальным кардиоинтервалами в выборке); индекс напряжения регуляторных систем (стресс-индекс) (Баевский и др., 2001; Баевский и др., 1984); соответствующие международным стандартам триангулярный индекс (ТИ), равный отношению общего числа кардиоинтервалов к амплитуде моды, и индекс триангулярной интерполяции (ИТИ), отражающий ширину гистограммы (Malik et al., 1996); в) *спектрального анализа* — значения мощности спектра в диапазонах частот (согласно международным стандартам (Malik et al., 1996): суммарной (Total Power — TP), мс^2 , равной сумме спектральных мощностей в высокочастотном (0,15 — 0,4 Гц), низкочастотном (0,04 — 0,15 Гц) и очень низкочастотном диапазонах (0,003 — 0,04 Гц) (Malik et al., 1996), а также доли мощностей в высокочастотном (High Frequency — HF) и низкочастотном (Low Frequency — LF) диапазонах от суммарной мощности (%), и их соотношение (по этому показателю статистически значимые изменения не наблюдались; его величина далее не приводится); г) *скаттерографический*: длина продольной оси скаттерограммы. Для вычисления спектральных показателей ВСП проводили интерполяцию кривой RR-интервалов с шагом дискретизации 0,25 с. Спектр RR-кривой вычисляли с помощью быстрого преобразования Фурье.

Следуя традиционной схеме анализа данных, проверяли гипотезу о нормальности распределений зарегистрированных показателей с помощью критерия Шапиро—Уилка. Так как половину распределений сенсомоторных показателей функционального состояния и более четверти распределений показателей ВСП не было оснований считать нормальными, дальнейший анализ проводили с использованием непараметрических тестов: Манна—Уитни (в тексте обозначен как U), парного критерия Вилкоксона (в тексте обозначен как W) и теста знаков (в тексте обозначен как S), непараметрического корреляционного анализа (критерий Спирмена), а также теста сравнения дисперсий Брауна—Форсайта (в тексте обозначен как BF). Статистически значимыми считали различия на уровне $p < 0,05$. Использовали программу STATISTICA (v.10.0).

Результаты

Активность автономной (вегетативной) системы, обеспечивающей адаптацию организма к когнитивной деятельности, оценивали по вариабельности сердечного ритма. В качестве одного из наиболее информативных комплексных показателей, учитывающих активацию как симпатического, так и парасимпатического отделов автономной нервной системы, использовали индекс напряжения регуляторных систем (ИН) (Баевский и др., 1984; Бань, Загородный, 2010). По динамике ИН при переходе к когнитивной деятельности мы разделили участников исследования на две группы: в первой наблюдалось снижение ИН во время нагрузки по сравнению с исходным состоянием, во второй — повышение. Данные представлены в табл. 1, в которой приведены как традиционно применяемые меры центральной тенденции — средние значения, так и формально более подходящие для используемых непараметрических статистических тестов медианы. Большинство показателей сердечного ритма, зарегистрированных перед нагрузкой, в данных группах были различными. Так, у исследуемых из второй группы значения ИН и ИВР были статистически значимо более низкими (тест U, $p = 0,013$ и $p = 0,024$), а величины КВ, ТИ, длины продольной оси



скаттерограммы, суммарной спектральной мощности регуляторных влияний более высокими (тест U, $p=0,006$, $p=0,038$, $p=0,005$, $p=0,005$ соответственно) по сравнению с участниками из первой группы (табл. 1). Для второй группы также была обнаружена статистически значимо большая variability ИТИ и доли низкочастотного спектрального компонента, чем в первой группе (тест BF, $p=0,013$ и $p=0,019$) (табл. 1).

При когнитивной нагрузке у исследуемых из первой группы наблюдались статистически значимые изменения большинства показателей: снижение ИН и ИВР (W-критерий, $p=0,001$ и $p=0,013$), увеличение ТИ, ИТИ, КВ, длины продольной оси скаттерограммы, суммарной спектральной мощности (W-критерий, $p=0,014$, $p=0,016$, $p=0,014$, $p=0,001$, $p=0,001$ соответственно) (табл. 1). У 71% участников этой группы повышался рNN50.

У исследуемых из второй группы во время нагрузки отмечалось только повышение ИН (W-критерий, $p=0,005$). Статистически значимых изменений остальных показателей при нагрузке в этой группе не обнаружено (табл. 1). Однако при анализе индивидуальной динамики показателей сердечного ритма мы заметили преимущественное снижение следующих показателей во время нагрузки: суммарной спектральной мощности у 90%, ИТИ у 70% и ТИ у 60% участников из второй группы.

Сдвиги variability ритма сердца после прекращения когнитивной деятельности наблюдались только в первой группе. По сравнению с показателями, зарегистрированными при нагрузке, у обследованных этой группы в конце эксперимента статистически значимо снижались ИН и ЧСС, повышался ТИ (W-критерий, $p=0,001$, $p=0,019$, $p=0,035$ соответственно) (табл. 1). Большинство показателей в этот период у них также отличались от исходных (перед нагрузкой): коэффициент вариации, ТИ, длина продольной оси скаттерограммы, суммарная спектральная мощность регуляторных влияний были статистически значимо выше (W-критерий, $p=0,014$, $p=0,002$, $p=0,001$, $p=0,001$ соответственно), а ЧСС, ИН, ИВР и доля спектральной мощности в низкочастотном диапазоне — ниже (W-критерий, $p=0,008$, $p=0,001$, $p=0,016$, $p=0,016$ соответственно) (табл. 1). В этом состоянии по сравнению с предыдущими у исследуемых данной группы отмечается наиболее низкое значение ИН и наиболее высокое значение триангулярного индекса.

Во второй группе статистически значимых изменений variability сердечного ритма после нагрузки не обнаружено. Наблюдалось лишь снижение ЧСС (W-критерий, $p=0,011$) (табл. 1). При анализе индивидуальной динамики показателей отмечено уменьшение суммарной спектральной мощности у 75% человек из этой группы, а у двух испытуемых — ее увеличение до значений более 15000 мс^2 .

При сравнении психофизиологических показателей функционального состояния участников выделенных групп статистически значимых различий не обнаружено (табл. 2). Для оценки связи между психосоматическими реакциями и вегетативными влияниями на сердечный ритм мы провели корреляционный анализ между характеристиками сенсомоторных реакций и показателями ритма сердца, зарегистрированными перед когнитивной нагрузкой. В первой группе исследуемых получены статистически значимые отрицательные корреляции между долей высокочастотного компонента спектра (HF%) и показателями скорости зрительно-моторных реакций — средним временем простой реакции ($r=-0,67$, $n=14$, $p=0,009$), средним квадратичным отклонением времени реакции выбора ($r=-0,59$, $n=14$, $p=0,027$). В этой группе также обнаружены статистически значимые корреляционные связи между средним квадратичным отклонением времени простой зрительно-моторной реакции и показателями variability ритма сердца: индексами напряжения и вегетативного равновесия ($r=0,55$, $n=14$, $p=0,043$ и $r=0,56$,



Таблица 1

**Показатели variability сердечного ритма перед,
 во время и после когнитивной нагрузки**
**(в каждой ячейке в верхней строке представлены среднее значение ± ошибка
 среднего, в нижней — медиана, нижний и верхний квартили распределений)**

Показатель	Группа 1, n=14			Группа 2, n=10		
	Перед нагрузкой	Во время нагрузки	После нагрузки	Перед нагрузкой	Во время нагрузки	После нагрузки
ЧСС, уд./мин	83,61±4,20	81,41±3,58	76,11±2,80	74,44±4,20	77,94±4,07	72,71±3,53
	80,0; 71,5; 94,7	81,90; 70,20; – 87,70	75,05; 67,20; 84,5 aa, bbb	72,50; 66,10; 79,90	75,90; 66,80; 83,0	71,90; 64,80; 72,20 b
Коэффициент вариации	6,25±0,43	7,75±0,55	8,13±0,66	9,91±1,43	9,38±1,40	8,82±1,53
	5,87; 5,10; 7,04	7,71; 6,54; 8,95 a	8,02; 5,70; 10,15 a	8,79; 7,08; 11,07**	8,61; 6,61; 10,48	8,15; 5,20; 13,15
pNN50	12,75±4,81	17,23±3,82	19,48±4,41	27,28±8,21	27,0±7,42@	32,46±8,46
	5,10; 1,40; 17,0	16,65; 3,60; 28,90	12,40; 5,10; 33,0	26,05; 2,80; 39,90	27,55; 4,20; 51,20	34,55; 11,30; 52,50
ИН	186,1±35,5	113,19±24,98	93,47±22,49	70,68±19,09	115,31±39,72	108,75±48,71
	153,0; 87,21; 298,70	79,10; 50,85; 123,41 aaa	71,38; 33,70; 101,40 aaa, b	41,83; 27,33; 129,38*	49,37; 37,06; 192,76 a	44,41; 21,82; 193,31
ТИ	10,54±0,96	12,36±0,85	14,21±1,33	15,6±1,8	15,29±1,53	13,95±1,8
	10,25; 8,10; 13,10	12,50; 9,30; 14,40 A	14,05; 10,0; 16,40 aa, b	14,45; 11,10; 20,30*	14,60; 11,60; 19,90	13,90; 8,0; 18,70
ИТИ	237,21±18,56	278,71±18,13	308,36±31,61	385,3±73,21@	290,50±26,38	310,9±46,90
	229,0; 180,0; 282,0	284,50; 241,0; 305,0 A	304,5; 217,0; 410,0 aa	298,0; 217,0; 529,0	306,0; 211,0; 332,0	293,0; 197,0; 410,0
ИВР	194,41±29,12	138,81±22,19	132,19±28,30	101,01±23,58	98,63±22,81	147,81±59,06
	187,0; 95,5; 251,3	116,30; 92,50; 171,40 A	90,15; 59,40; 172,80 a	67,70; 46,50; 191,40 *	74,35; 53,70; 110,20	76,65; 36,20; 231,0
Сумм. спектр. мощность (мс ²)	2322,9±509,3	4110,6±674,3	5073,6±786,4	12743,1±7272,5	7227,8±2846,9	24635,7±17103,2
	1586,5; 1124,0; 2927,0	3528,0; 2927,0; 4480,0 aaa	4233,0; 3067,0; 7509,0 aaa	5149; 2573; 8725 *	5364,0; 1286,0; 7180,0	5100,0; 2049,5; 19670,0
HF (%)	24,30±4,0	25,57±3,16	30,0±4,0	23,43±5,46	28,23±3,94	28,8±7,16
	20,25; 14,60; 31,80	22,90; 16,10; 32,50	26,65; 13,0; 37,50	17,55; 13,30; 23,10	26,45; 16,90; 38,80	19,30; 16,0; 40,05
LF (%)	38,36±2,80	37,33±2,96	31,95±2,34	37,97±5,84@	33,23±2,98	34,52±8,16@
	37,30; 34,50; 44,30	35,95; 28,40; 42,0	31,65; 22,30; 38,30 a	38,15; 20,60; 50,80	32,55; 25,50; 42,90	31,45; 12,20; 54,55
Длина продольной оси скаттерограммы (мс)	123,93±14,76	164,0±16,44	188,29±18,42	243,5±52,29	198,9±30,47	209,88±37,95
	105,0; 86,0; 144,0	147,5; 136,0; 185,0 aaa	185,50; 138,0; 234,0 aa	195,0; 138,0; 258,0**	191,0; 108,0; 234,0	187,0; 123,5; 314,5

Примечание: 1) статистически значимые межгрупповые различия обозначены: «*» — различия медиан (тест U), @ — различия дисперсий (тест BF); 2) статистически значимые различия между показателями, зарегистрированными у одних и тех же лиц в разных состояниях (W-критерий): **a** — отличие от показателя, зарегистрированного перед нагрузкой, **b** — отличие от показателя, зарегистрированного во время нагрузки. Один знак: p<0,05, два — p<0,01, три — p<0,001.



$n=14$, $p=0,039$ соответственно), ЧСС ($r=0,57$, $n=14$, $p=0,035$), длиной продольной оси скаттерограммы ($r=-0,55$, $n=14$, $p=0,043$) — и корреляции числа ошибок при этой зрительно-моторной пробе с ЧСС ($r=0,55$, $n=14$, $p=0,040$). Коэффициент утомления в тепшинг-тесте статистически значимо коррелировал с ЧСС ($r=-0,55$, $n=14$, $p=0,043$) и рNN50 ($r=0,63$, $n=14$, $p=0,015$).

Во второй группе исследуемых также получены статистически значимые отрицательные корреляции между долей спектральной мощности в высокочастотном диапазоне и показателями скорости зрительно-моторных реакций — средними значениями времени простой реакции и реакции выбора ($r=-0,70$, $n=10$, $p=0,024$ и $-0,73$, $n=10$, $p=0,017$ соответственно), числом ошибок при реакции выбора ($r=0,79$, $n=10$, $p=0,007$). Последний показатель также был связан с рNN50 ($r=0,70$, $n=10$, $p=0,023$) в этой группе.

Таблица 2

**Показатели функционального состояния перед когнитивной нагрузкой
(в каждой ячейке в верхней строке представлены среднее значение \pm ошибка среднего, в нижней — медиана, нижний и верхний квартили распределений)**

Тест	Показатель	Группа 1, $n=14$	Группа 2, $n=10$
Тепшинг	Средняя частота ударов	$6,55 \pm 0,20$ 6,59; 5,99; 6,97	$6,55 \pm 0,23$ 6,36; 5,91; 6,84
	Коэффициент утомления	$0,17 \pm 0,02$ 0,17; 0,15; 0,20	$0,19 \pm 0,02$ 0,21; 0,14; 0,24
Простая зрительно-моторная реакция	Время реакции (среднее за 20 проб), мс	$219,75 \pm 15,73$ 207,11; 180,11; 228,40	$209,48 \pm 8,61$ 204,13; 187,84; 212,05
	Среднее квадратичное отклонение времени реакции (среднее за 20 проб), мс	$74,18 \pm 36,40$ 42,86; 26,09; 46,87	$41,60 \pm 5,27$ 39,16; 26,55; 54,90
	Число ошибок	$0,86 \pm 0,23$ 1,0; 0; 2,0	$0,40 \pm 0,27$ 0; 0; 0
	Доля исследуемых, не сделавших ошибок	43%	80%
Реакция выбора	Время реакции (среднее за 20 проб), мс	$346,50 \pm 13,51$ 325,29; 305,71; 385,47	$336,02 \pm 16,60$ 340,40; 291,42; 354,20
	Среднее квадратичное отклонение времени реакции (среднее за 20 проб), мс	$74,17 \pm 5,16$ 73,14; 62,43; 81,75	$71,05 \pm 5,77$ 68,08; 57,64; 87,53
	Число ошибок	$1,86 \pm 0,56$ 1,0; 0; 3,0	$2,70 \pm 1,11$ 1,5; 0; 4,0
	Доля исследуемых, не сделавших ошибок	27%	40%
Реакция на движущийся объект	Доля точных реакций (%)	$46,79 \pm 3,58$ 47,50; 35,0; 55,0	$53,0 \pm 6,06$ 52,5; 45,0; 60,0
	Доля опережающих реакций (%)	$27,85 \pm 4,85$ 25,0; 15,0; 35,0	$28,0 \pm 6,67$ 27,5; 15,0; 35,0
	Доля запаздывающих реакций (%)	$25,0 \pm 5,0$ 22,5; 15,0; 25,0	$18,5 \pm 3,80$ 17,5; 10,0; 25,0

Эффективность решения когнитивных задач по критериям времени и правильности решения практически не различалась в выделенных группах. Статистически значимые раз-



личия были получены лишь для времени решения правильно решенных логических заданий: исследуемые из первой группы выполняли такие задания быстрее (тест S, $p=0,025$). Медиана, среднее время, ошибка средней этих выборок для первой и второй групп составили 15,7; 19,18; 1,41 и 21,0; 22,57; 1,43 соответственно.

Обсуждение

Системный подход к организации поведения и принцип активности предполагают проявление индивидуальных особенностей в работе сложившейся функциональной системы поведенческого акта как на стадии подготовки к нему, так и на каждом этапе реализации (Крылов, Александров, 2011). Важным компонентом любой функциональной системы является перестройка вегетативных регуляторных влияний, направленных на поддержание деятельности интенсивно работающих органов. Чувствительным индикатором таких перестроек может служить сердечный ритм, в управлении которым через эфферентные пути автономной нервной системы участвуют центры различных уровней головного мозга, включая префронтальную зону коры больших полушарий (Баевский и др., 2001; McCraty, Shaffer, 2015; Thayer, Lane, 2009). Таким образом, динамика variability сердечного ритма во время какой-либо трудовой деятельности отражает адаптивные возможности и может служить прогностическим маркером успешности достижения результата, включающей не только точность и скорость выполнения задания, но и энергетические затраты, а также скорость восстановления показателей функционирования организма после завершения работы (Дегтярев и др., 2009). Исходя из сказанного, типология вегетативной адаптации по характеру перестроек в управлении сердечным ритмом значима для оптимизации условий труда и отдыха с учетом индивидуальных физиологических особенностей субъекта. Наиболее важной деятельностью для человека в современном мире является умственная, включающая когнитивные процессы. В психологии и психофизиологии понятия «умственная» и «когнитивная» деятельности часто используются совместно, когнитивная деятельность участвует в организации умственной и связана с решением объективных задач с участием памяти, внимания, мышления, требующих умственных усилий (Taylor et al., 2016).

Анализ динамики variability ритма сердца во время когнитивной нагрузки позволил нам выявить два типа адаптации вегетативных регуляторных механизмов к нагрузке. Основой для классификации послужило изменение индекса напряжения регуляторных систем — интегрального показателя, учитывающего степень активации как симпатических, так и парасимпатических влияний на ритм сердечных сокращений. Для участников из первой группы было характерно снижение ИН во время нагрузки, что предполагает увеличение доли парасимпатических влияний и снижение уровня симпатических влияний на сердечный ритм. С этим предположением согласуется и изменение других индексов в данной группе во время когнитивной деятельности: снижение индекса вегетативного равновесия, увеличение треугольного индекса и индекса треугольной интерполяции. В этой группе также возрастали коэффициент вариации, длина продольной оси скаттерограммы — такого рода динамика показателей, основанных на оценке дисперсии, отражает увеличение variability сердечного ритма. У большинства обследованных из первой группы при нагрузке увеличивался показатель $rNN50$, наиболее специфично отражающий уровень парасимпатических влияний на ритм сердца. Известно, что симпатическая активация обеспечивает, в первую очередь, генерализованную мобилизацию ресурсов организма, а парасимпатическая — локальную адаптацию отдельных органов и систем, специфично по отноше-



нию к их вовлечению в текущую деятельность (Ноздрачев и др., 1991). В частности, быстрые изменения выраженности влияний блуждающего нерва на сердечный ритм могут свидетельствовать о высокой чувствительности автономного контура регуляции ритма сердца к импульсации от баро- и хеморецепторов, способствующие оптимальному согласованию работы дыхательной и сердечно-сосудистой систем (Hayano, Yasuma, 2003). Увеличение активности автономного контура регуляции при умственной нагрузке подтверждают данные Pfurtscheller et al. (2007) о снижении ЧСС при увеличении сложности когнитивной задачи. Кроме того, смена стимулов вызывает поочередное замедление—ускорение частоты сокращений сердца (Каплан, Шишкин, 1992; Jennings et al., 2015), связанное с ожиданием нового стимула и его последующим восприятием, что может также увеличивать variability сердечного ритма. При этом адаптация к деятельности у испытуемых первой группы сопровождалась увеличением суммарной спектральной мощности регуляторных влияний, что свидетельствует об активации психофизиологических ресурсов. После завершения решения задач у исследуемых первой группы ИН и ЧСС снижаются, триангулярный индекс возрастает. В этом состоянии variability сердечного ритма максимальна, а ЧСС и доля низкочастотных волн в суммарной спектральной мощности регуляторных влияний ниже по сравнению с исходным состоянием. Данный факт свидетельствует об уменьшении симпатических влияний на сердечный ритм, что, вероятно, обусловлено снижением психоэмоционального напряжения в связи с окончанием обследования. Заметим, что у исследуемых первой группы ЧСС была относительно высокой не только во время нагрузки, но и перед ней, что характеризует умеренно повышенную активность симпатического отдела (Машин, 2011). Такая активность необходима для экономичной регуляции сердечного ритма во время нагрузки, и ее реализация перед нагрузкой формирует опережающую адаптацию.

У исследуемых второй группы ИН во время нагрузки возрастал по сравнению с исходным состоянием, а суммарная спектральная мощность снижалась. Остальные показатели ритма сердца в этой группе не изменялись при решении задач, а также после нагрузки, что, по-видимому, свидетельствует, о низкой лабильности адаптивных процессов. В начале эксперимента, перед нагрузкой, у исследуемых второй группы по сравнению с первой наблюдались пониженные значения индексов напряжения вегетативного равновесия и более высокие триангулярный индекс и индекс триангулярной интерполяции, а также большие величины коэффициента вариации, длины продольной оси скаттерограммы — подобная динамика отражает большую variability сердечного ритма. Наряду с этим у них была значительно выше общая мощность регуляторных влияний, что свидетельствует об избыточной активации вегетативных ресурсов, по-видимому, в связи с ориентировочной реакцией на ситуацию обследования. Аргументом в пользу данного предположения служит снижение суммарной спектральной мощности при переходе от новизны ситуации обследования к конкретной деятельности и, соответственно, уменьшению интенсивности ориентировочной реакции. После нагрузки у 75% участников из этой группы суммарная спектральная мощность еще больше снижалась, что может отражать снижение возбудимости ЦНС в условиях завершения деятельности. При нагрузке значения ИН и суммарной спектральной мощности у обследованных из второй группы приближались к значениям, характерным для первой группы. Изменений других показателей регуляторных влияний на сердечный ритм при переходе к когнитивной нагрузке и после завершения решения задач в этой группе не происходило. Не наблюдалось различий ЧСС до и после нагрузки, что может свидетельствовать о преобладании трофотропной регуляции сердечного рит-



ма в состоянии перед нагрузкой (Машин, 2011), не способствующей быстрой активации системы кровообращения во время когнитивной деятельности. Согласно трехфакторной модели регуляции сердечного ритма, для трофотропного типа поведения характерны и высокие значения среднего квадратичного отклонения выборки кардиоинтервалов, производным показателем которого является коэффициент вариации. У лиц второй группы коэффициент вариации перед нагрузкой был выше по сравнению с участниками первой группы и до конца обследования оставался высоким. Такая стабильность механизмов регуляции, очевидно, снижает возможность адаптации к быстро изменяющимся условиям среды. Отсутствие статистически значимых межгрупповых различий во время и после нагрузки свидетельствует о протекании когнитивной деятельности у исследуемых второй группы в условиях слабо выраженных адаптивных перестроек. Большая дисперсия отдельных показателей ритма сердца в состоянии до, во время и после нагрузки, характерная для данной группы, позволяет предположить формирование индивидуальных способов компенсации недостаточности механизмов вегетативной адаптации к психически напряженной деятельности. Сделанные нами предположения о большей адаптивности к когнитивной нагрузке у лиц первой группы по сравнению со второй согласуются с данными Даниловой, Астафьева (Данилова, Астафьев, 1999) о динамике индекса напряжения у участников, с разной успешностью решавших арифметические задачи. У решавших более успешно индекс напряжения перед нагрузкой был значительно выше по сравнению с остальными испытуемыми, а во время решения задач он статистически значимо снижался.

Отсутствие межгрупповых различий по показателю HF (%), на наш взгляд, свидетельствует об однотипных механизмах управления в пределах автономного контура регуляции сердечного ритма. Следовательно, выявленные нами особенности динамики показателей ВСР при когнитивной нагрузке относятся преимущественно к центральному контуру регуляции, более тесно связанному с организацией адаптивного поведения (Баевский и др., 2001).

Аналогичные типы реакций на когнитивную нагрузку были выявлены у спортсменов в исследовании Ларионовой, Викулова (Ларионова, Викулов, 2005). По данным авторов, у лиц одной группы при решении арифметических задач наблюдались снижение индекса напряжения, ИВР, повышение дисперсии кардиоинтервалов, в то время как другая группа спортсменов характеризовалась изменениями противоположной направленности. В состоянии покоя у испытуемых первой группы по сравнению со второй были обнаружены более высокие значения индекса напряжения, ИВР, наряду с меньшими значениями показателей дисперсии и ТР, что совпадает с описанными нами характеристиками. Однако в работе Ларионовой, Викулова были зарегистрированы статистически значимые сдвиги показателей ВСР при нагрузке, с том числе и спектральных, у лиц обеих групп, в то время как в нашем исследовании во второй группе отмечалось отсутствие изменений значений большинства показателей ВСР, и в обеих группах не происходило статистически значимых изменений доли высокочастотных и низкочастотных компонентов спектра. Мы полагаем, что различия данных, полученных нами и Ларионовой, Викуловым, связаны с разным уровнем физической тренированности обследованных. Об этом также свидетельствуют низкие значения индекса напряжения у спортсменов перед когнитивной нагрузкой ($60,65 \pm 18,98$ в первой группе и $35,56 \pm 19,81$ во второй) (Ларионова, Викулов, 2005). По-видимому, спортивная подготовка существенно изменяет механизмы вегетативных реакций, что отражается и в характере перестроек сердечного ритма при других видах деятельности, в частности, умственной.



В работе Даниловой и др. (1994) также описаны два типа перестроек ВСР при когнитивной нагрузке по знаку изменений величины стандартного отклонения по сравнению с состоянием перед нагрузкой. Для одной группы испытуемых, показатели ВСР которых характеризовались увеличением стандартного отклонения, было выявлено снижение ИН при решении арифметических задач, а для участников второй группы — увеличение ИН, что согласуется с полученными нами данными. Авторы выявили различия в личностной тревожности у испытуемых выделенных групп (Данилова и др., 1994). Такие результаты свидетельствуют о взаимосвязи организации управления сердечным ритмом с психическими характеристиками и являются подтверждением концепции нейровисцеральной интеграции (Thayer, Lane, 2009), учитывающей корково-лимбические влияния на стволовые центры управления сердечным ритмом.

Психические возможности выполнения когнитивной деятельности у обследованных из выделенных нами групп не различались по стандартным психофизиологическим показателям уровня функционального состояния. В каждой группе скорость зрительно-моторных реакций коррелировала с активностью автономного контура регуляции ритма сердца, выраженной в доле высокочастотных волн, что говорит о связи чувствительности центра влияний блуждающего нерва на ритм сердца с функциональным состоянием и согласуется с данными других исследований (Caruana et al., 2014). Однако были выявлены и групповые особенности взаимодействий между эффективностью психомоторных тестов и вегетативным статусом организма: так, результаты анализа полученных данных свидетельствуют о наличии положительной взаимосвязи величины дисперсии времени простой зрительно-моторной реакции со степенью стабилизации сердечного ритма в первой группе испытуемых, а также о положительной корреляции числа ошибок при ее выполнении с ЧСС и, следовательно, о негативном влиянии избыточного психо-эмоционального напряжения на выполнение теста. С другой стороны, высокий уровень ЧСС и снижение выраженности парасимпатических влияний (по показателю r_{NN50}) в данной группе связано с возможностью длительно сохранять высокий темп работы в теппинг-тесте. Это свидетельствует о возможности достижения у лиц данной группы оптимального баланса симпатических и парасимпатических влияний на сердечный ритм, когда человек может работать с высокой скоростью и минимальным количеством ошибок.

Во второй группе обследованных большая активность парасимпатических влияний (по показателям доли спектральной мощности в высокочастотном диапазоне и r_{NN50}) связана с большим числом ошибок при реакции выбора, требующей по сравнению с простой сенсомоторной реакцией большего вовлечения когнитивных процессов в оценку предъявляемого стимула. Следовательно, адаптация к нагрузке за счет возрастания парасимпатических влияний на сердечный ритм у лиц, относящихся ко второй группе, может привести к возрастанию ошибок при задачах, требующих сравнения стимулов наряду с быстрым принятием решения.

Таким образом, функциональное состояние у обследованных из выделенных групп определяется различными механизмами вегетативного обеспечения психической деятельности.

Выводы

На основе динамики индекса напряжения регуляторных систем организма выделены два типа перестроек вегетативной регуляции сердечного ритма во время когнитивной нагрузки.



Первый тип характеризуется снижением индекса напряжения и увеличением вариабельности сердечного ритма при когнитивной нагрузке наряду с увеличением суммарной спектральной мощности регуляторных влияний на ритм сердца; второй — увеличением индекса напряжения при отсутствии существенных изменений других показателей сердечного ритма.

Для выделенных типов характерны различные корреляционные зависимости между показателями сенсомоторных реакций и вариабельности сердечного ритма.

Литература

1. Баевский Р.М., Иванов Г.Г., Чирейкин Л.В., Довгалецкий П.Я., Кукушкин Ю.А., Миронова Т.Ф., Прилуцкий Д.А., Семенов А.В., Федоров В. Ф., Флейшман А.Н., Медведев М.М. Анализ вариабельности сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем (Часть 1) // Вестник аритмологии. 2001. № 24. С. 65–87.
2. Баевский Р.М., Кириллов О.И., Клецкин С.З. Математический анализ изменений сердечного ритма при стрессе // М.: Наука, 1984. 221 с.
3. Бань А.С., Загородный Г.М. Вегетативный показатель для оценки вариабельности ритма сердца спортсменов // Медицинский журнал. 2010. № 4. С. 127–130.
4. Данилова Н.Н., Коршунова С.Г., Соколов Е.Н. Показатели сердечного ритма при решении человеком арифметических задач // Журнал высшей нервной деятельности имени И.П. Павлова. 1994. Т. 44. № 6. С. 932–943.
5. Данилова Н.Н., Астафьев С.В. Изменения вариабельности сердечного ритма при информационной нагрузке // Журнал высшей нервной деятельности имени И.П. Павлова. 1999. Т. 49. № 1. С. 28–38.
6. Дегтярев В.П., Раевская О.С., Шишелова А.Ю., Климина Н.В., Александян О.В. Физиология трудовой деятельности: учеб. пособие. М., 2009, ВНУМЦ, 56 с.
7. Джебраилова Т.Д., Коробейникова И.И., Дудник Е.Н., Каратыгин Н.А. Вегетативные корреляты индивидуальных различий временных параметров и результативности интеллектуальной деятельности человека // Физиология человека. 2013. Т. 39. № 1. С. 94–102.
8. Каплан А.Я., Шишкин С.Л. Кардиосинхронные феномены работы мозга: Психофизиологические аспекты // Научные доклады высшей школы. Сер. Биологические науки. 1992. № 10. С. 5–24.
9. Котельников С.А., Ноздрачев А.Д., Одинак М.М., Шустов Е.Б., Коваленко И.Ю., Давыденко В.Ю. Вариабельность ритма сердца: представления о механизмах // Физиология человека. 2002. Т. 28. № 1. С. 130–143.
10. Крылов А.К., Александров Ю.И. Методы экспериментального исследования в парадигмах активности и реактивности // Современная экспериментальная психология: в 2 т. / Под ред. В.А. Барабанщикова. М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 2011. Т. 1. С. 463–478.
11. Ларионова Е.Л., Викулов А.Д. Некоторые особенности срочной адаптации организма спортсменов к стрессовой нагрузке // Ярославский педагогический вестник. 2005. № 1. С. 45–51.
12. Лоскутова А.Н., Максимов А.Л. Вариабельность сердечного ритма у подростков с различным уровнем активности вегетативной нервной системы при ортостатической пробе // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2013. № 4. С. 104–110.
13. Мартынова О.В., Роик А.О., Иваницкий Г.А. Изменение некоторых показателей функционирования сердечно-сосудистой системы при различных мыслительных операциях // Физиология человека. 2011. Т. 37. № 6. С. 35–41.
14. Машин В.А. К вопросу классификации функциональных состояний человека // Экспериментальная психология, 2011. Т. 4. № 1. С. 40–56.
15. Ноздрачев А.Д., Баженов Ю.И., Баранникова И.А. и др. Общий курс физиологии человека и животных. Физиология висцеральных систем / Под ред. А.Д. Ноздрачева. М.: Высшая школа, 1991. 528 с.
16. Усенко А.Б., Кузьмина К.А. Особенности произвольной саморегуляции поведения младших подростков с разными типами вегетативного реагирования // Психологические исследования. 2012. Т. 5. № 24. С. 1–18.



17. Шлык Н.И., Сапожникова Е.Н. К вопросу о методических подходах к анализу variability сердечного ритма // Педагогико-психологические и медико-биологические проблемы физической культуры и спорта. 2008. Т. 1. № 6. С. 1–17.
18. Шлык Н.И., Сапожникова Е.Н. Анализ variability сердечного ритма и дисперсионного картирования ЭКГ у участников параллельных исследований «Марс-500» с разными преобладающими типами вегетативной регуляции (Ижевская экспериментальная группа) // Вестник Удмуртского университета. Серия «Биология. Науки о Земле». 2012. Вып. 1. С. 109–113.
19. Caruana L.J., Dywan J., Tays W.J., Elmers J.L., Witherspoon R., Segalowitz S.J. Factors influencing the role of cardiac autonomic regulation in the service of cognitive control // Biol Psychol. 2014. Vol. 102. P. 88–97. doi: 10.1016/j.biopsycho.2014.07.015
20. Elliot A.J., Payen V., Brisswalter J., Cury F., Thayer J.F. A subtle threat cue, heart rate variability, and cognitive performance // Psychophysiology. 2011. Vol. 48. № 10. P. 1340–5. doi: 10.1111/j.1469-8986.2011.01216.x.
21. Jennings J.R., Allen B., Gianaros P.J., Thayer J.F., Manuck S.B. Focusing neurovisceral integration: Cognition, heart rate variability, and cerebral blood flow // Psychophysiology. 2015 Vol. 52. № 2. P. 214–224. doi: 10.1111/psyp.12319
22. Hayano J., Yasuma F. Hypothesis: respiratory sinus arrhythmia is an intrinsic resting function of cardiopulmonary system // Cardiovascular Research. 2003. Vol. 58. Issue 1. P. 1–9.
23. Malik M., Thomas Bigger J., Camm A.J., Kleiger R.E., Malliani A., Moss A.J., Schwartz P.J. Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology // Circulation. 1996. Vol. 93. № 5. P. 1043–1065.
24. McCraty R., Shaffer F. Heart Rate Variability: New Perspectives on Physiological Mechanisms, Assessment of Self-regulatory Capacity, and Health Risk // Global advances in health and medicine. 2015. Vol. 4. № 1. P. 46–61.
25. Pfuertscheller G., Grabner R.H., Brunner C., Neuper C. Phasic heart rate changes during word translation of different difficulties // Psychophysiology. 2007. Vol. 44. № 5. P. 807–813.
26. Ritz K., van Buchem M.A., Daemen M.J. The heart-brain connection: mechanistic insights and models // Neth Heart J. 2013. Vol. 21. № 2. P. 55–57. doi: 10.1007/s12471-012-0348-9.
27. Stenfors C.U., Hanson L.M., Theorell T., Osika W.S. Executive Cognitive Functioning and Cardiovascular Autonomic Regulation in a Population-Based Sample of Working Adults // Front Psychol. 2016. Vol. 7: article 1536. P. 1–13. doi: 10.3389/fpsyg.2016.01536
28. Takada M., Ebara T., Sakai Y., Kuwano Y. Stationarity of the heart rate variability by acceleration plethysmography: short-term measurements of healthy young males in daily life // J Hum Ergol (Tokyo). 2009. Vol. 38. № 2. P. 41–50.
29. Taylor L., Watkins S.L., Marshall H., Dascombe B.J., Foster J. The Impact of Different Environmental Conditions on Cognitive Function: A Focused Review // Front Physiol. 2016. Vol. 6: article 372. P. 1–12. doi: 10.3389/fphys.2015.00372
30. Thayer J.F., Lane R.D. Claude Bernard and the heart-brain connection: further elaboration of a model of neurovisceral integration // Neurosci Biobehav Rev. 2009. Vol. 33. № 2. P. 81–88. doi: 10.1016/j.neubiorev.2008.08.004.
31. Tsunoda K., Chiba A., Chigira H., Yoshida K., Watanabe T., Mizuno O. Online estimation of a cognitive performance using heart rate variability // Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc. 2016 P. 761–765. doi: 0.1109/EMBC.2016.7590813.



THE TYPOLOGY OF MECHANISMS OF ADAPTATION TO THE COGNITIVE LOAD ON THE VARIABILITY OF HEART RATE DYNAMICS

BODROV I.G.*, Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia,
e-mail: igor.shev4@gmail.com

SHISHELOVA A.YU.**, Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny;
Pirogov Russian National Research Medical University; Institute of Higher Nervous Activity
and Neurophysiology of RAS; Moscow, Russia,
e-mail: ihna_ann@mail.ru

ALIEV R.R.***, Institute for Theoretical and Experimental Biophysics RAS; Moscow Institute
of Physics and Technology; Federal Clinical and Scientific Center for Federal Biomedical
Agency of Russia, Moscow, Russia,
e-mail: rubaliev@gmail.com

While analyzing heart rate variability there were detected two types of visceral adaptation to cognitive activities: the first one is characterized by decrease of tension index (Baevskiy, 1984) and increase of heart rate variability at a cognitive load, along with increased power of regulatory effects on the heart rate; the second one is defined by higher heart rate variability, higher power of regulatory effects before the cognitive load and increase of the strain index during cognitive load in the absence of other significant changes. It is peculiar for people related to these types to possess different correlation relationships between the indices of sensory-motor reactions and heart rate variability.

Keywords: heart rate variability, cognitive activity, functional state, adaptation.

References

1. Baevskiy R.M., Ivanov G.G., Chireykin L.V., Gavrilushkin A.P., Dovgalevskiy P.Ya., Kukushkin Yu.A., Mironova T.F., Prilutskiy D.A., Semenov A.V., Fedorov V.F., Fleyshman A.N., Medvedev M.M. Analiz variabelnosti serdechnogo ritma pri ispol'zovanii razlichnyih elektrokardiograficheskikh sistem (chast' 1) [HRV Analysis under the usage of different electrocardiography systems (part 1)]. *Vestnik aritmologii [Journal of arrhythmology]*, 2001, no. 24, pp. 65–87.
2. Baevskiy R.M., Kirillov O.I., Kletskin S.Z. *Matematicheskii analiz izmeneniy serdechnogo ritma pri stresse [Mathematical Analysis of Changes in Cardiac Rhythm Parameters During the Stress]*. M, Nauka, 1984. 221 p.

For citation:

Bodrov I.G., Shishelova A.Yu., Aliev R.R. The typology of mechanisms of adaptation to the cognitive load on the variability of heart rate dynamics. *Ekspertiment'naya psikhologiya = Experimental psychology (Russia)*, 2018, vol. 11, no. 3, pp. 78–93. doi:10.17759/exppsy.2018110306

* *Bodrov I.G.* PhD candidate, junior researcher, Human physiology laboratory, Moscow Institute of Physics and Technology E-mail: igor.shev4@gmail.com

** *Shishelova A.Yu.* PhD (Biology), Senior Researcher in Human physiology laboratory, Moscow Institute of Physics and Technology; Assistant Professor, Physiology Department, Pirogov Russian National Research Medical University (RNRMU); Senior Researcher in Neuroontogenesis Lab, Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of RAS. E-mail: ihna_ann@mail.ru

*** *Aliev R.R.* Dr.Sci. (Physical and Mathematical Sciences), Leading Researcher, Institute for Theoretical and Experimental Biophysics RAS; Header of the Electrophysiology Lab, Professor of the Computational Math Department, Moscow Institute of Physics and Technology; Header of the Experimental Cardiology Department, Federal Clinical and Scientific Center for Federal Biomedical Agency of Russia. E-mail: rubaliev@gmail.com



3. Ban' A.S., Zagorodnyiy G.M. Vegetativnyy pokazatel dlya otsenki variabel'nosti ritma serdtsa sportsmenov [Vegetative index for evaluating athletes heart rate variability]. *Meditsinskiy zhurnal [Medical journal]*, 2010, no. 4, pp. 127–130.
4. Capuana L.J., Dywan J., Tays W.J., Elmers J.L., Witherspoon R., Segalowitz S.J. Factors influencing the role of cardiac autonomic regulation in the service of cognitive control. *Biol Psychol*, 2014, vol. 102, pp. 88–97. doi: 10.1016/j.biopsycho.2014.07.015
5. Danilova N.N., Korshunova S.G., Sokolov E.N. Pokazateli serdechnogo ritma pri reshenii chelovekom arifmeticheskikh zadach [Indices of heart rate during solving arithmetical tasks in humans]. *Zhurnal vysshei nervnoi deyatel'nosti im. I.P. Pavlova [I.P. Pavlov Journal of Higher Nervous Activity]*, 1994, vol. 44, no. 6, pp. 932–943.
6. Danilova N.N., Astaf'ev S.V. Izmeneniya variabel'nosti serdechnogo ritma pri informatsionnoi nagruzke [Effects of informational load on heart rate variability]. *Zhurnal vysshei nervnoi deyatel'nosti im. I.P. Pavlova [I.P. Pavlov Journal of Higher Nervous Activity]*, 1999, vol. 49, no. 1, pp. 28–38.
7. Degtyarev V.P., Raevskaya O.S., Shishelova A.Yu., Klimina N.V., Aleksanyan O.V. *Fiziologiya trudovoi deyatel'nosti: Uchebnoe posobie [Physiology of work]*. Moscow, Publ. VNUMTs, 2009. 56 p.
8. Dzhebrailova T.D., Korobeinikova I.I., Dudnik E.N., Karatygin N.A. Vegetativnye korrelyaty individual'nykh razlichii vremennykh parametrov i rezul'tativnosti intellektual'noi deyatel'nosti cheloveka [Autonomic correlates of individual differences in human intellectual activity]. *Fiziologiya cheloveka [Human Physiology]*, 2013, vol. 39, no. 1, pp. 94–102.
9. Elliot A.J., Payen V., Brisswalter J., Cury F., Thayer J.F. A subtle threat cue, heart rate variability, and cognitive performance. *Psychophysiology*, 2011, vol. 48, no. 10, pp. 1340–1345. doi: 10.1111/j.1469-8986.2011.01216.x
10. Jennings J.R., Allen B., Gianaros P.J., Thayer J.F., Manuck S.B. Focusing neurovisceral integration: Cognition, heart rate variability, and cerebral blood flow. *Psychophysiology*, 2015, vol. 52, no. 2, pp. 214–224. doi: 10.1111/psyp.12319
11. Hayano J., Yasuma F. Hypothesis: respiratory sinus arrhythmia is an intrinsic resting function of cardiovascular system. *Cardiovascular Research*, 2003, vol. 58, no. 1, pp. 1–9.
12. Kaplan A.Ya., Shishkin S.L. Kardiosinhronnyie fenomeny raboty mozga: Psihofiziologicheskie aspekty [Cardiosynchronous phenomena of the brain: Psycho-physiological aspects]. *Nauchnyie doklady vysshey shkoly. Ser. Biologicheskii nauki [Scientific reports of higher education. Ser. Biological sciences]*, 1992, no. 10, pp. 5–24.
13. Kotel'nikov S.A., Nozdrachev A.D., Odinak M.M., Shustov E.B., Kovalenko I.Yu., Davydenko V.Yu. Variabel'nost' ritma serdtsa: predstavleniya o mekhanizmaxh [Variability in heart rhythm: approaches to mechanisms]. *Fiziologiya cheloveka [Human physiology]*, 2002, vol. 28, no. 1, pp. 130–143.
14. Krylov A.K., Aleksandrov Ju.I. Metody jeksperimental'nogo issledovaniya v paradigmat aktivnosti i reaktivnosti [Methods of experimental investigation in paradigmas of activity and reactivity]. *Sovremennaja eksperimental'naja psikhologiya. V 2 t. [Modern Experimental Psychology. In 2 vol.]*. V. A. Barabanshnikov, ed. Moscow, Izd-vo «Institut psihologii RAN», 2011. Vol. 1. pp. 463–478.
15. Larionova E.L., Vikulov A.D. Nekotorye osobennosti srochnoi adaptatsii organizma sportsmenov k stressovoi nagruzke [Some features of the urgent adaptation of the organism of athletes to stress load]. *Yaroslavskii pedagogicheskii vestnik [Yaroslavl Pedagogical Bulletin]*, 2005, no. 1, pp. 45–51.
16. Loskutova A.N., Maksimov A.L. Variabel'nost' serdechnogo ritma u podrostkov s razlichnym urovnem aktivnosti vegetativnoi nervnoi sistemy pri ortostaticheskoi probe [Heart rate variability in adolescents with different levels of activity in the autonomic nervous system with an orthostatic test]. *VESTNIK SVNTs DVO RAN [Vestnik North-east scientific centre of Far-Eastern Division of the Russian Academy of Science]*, 2013, no. 4, pp. 104–110.
17. Malik M., Thomas Bigger J., Camm A.J., Kleiger R.E., Malliani A., Moss A.J., Schwartz P.J. Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. *Circulation*, 1996, vol. 93, no. 5, pp. 1043–1065.
18. Martynova O.V., Roik A.O., Ivanitsky G.A. Izmenenie nekotorykh pokazateley funktsionirovaniya serdechnosudistoy sistemy pri razlichnykh myslitelnykh operatsiyah [Changes in indexes of cardiovascular system in different mental tasks]. *Fiziologiya cheloveka [Human physiology]*, 2011, vol. 37, № 6, pp. 35–41.



19. Mashin V.A. K voprosu klassifikatsii funktsional'nykh sostoyanii cheloveka [Some problems of operator functional states classification]. *Ekspertimental'naya psikhologiya [Experimental Psychology]*, 2011, vol. 4, no. 1, pp. 40–56.
20. McCraty R., Shaffer F. Heart Rate Variability: New Perspectives on Physiological Mechanisms, Assessment of Self-regulatory Capacity, and Health Risk. *Global advances in health and medicine*, 2015, vol. 4, no. 1, pp. 46–61.
21. Nozdrachev A.D., Bazhenov Yu.I., Barannikova I.A. i dr. Obschiy kurs fiziologii cheloveka i zhivotnyih. *Fiziologiya vistseral'nykh system. Pod red. A. D. Nozdracheva. [General course of human and animal physiology. Edited by A. D. Nozdrachev]*. M, Vysshaya shkola [High school], 1991. 528 p.
22. Pfurtscheller G., Grabner R.H., Brunner C., Neuper C. Phasic heart rate changes during word translation of different difficulties. *Psychophysiology*, 2007, vol. 44, no. 5, pp. 807–813
23. Ritz K, van Buchem M.A., Daemen M.J. The heart-brain connection: mechanistic insights and models. *Neth Heart J*, 2013, vol. 21, no. 2, pp. 55–57. doi: 10.1007/s12471-012-0348-9
24. Shlyk N.I., Sapozhnikova E.N. K voprosu o metodicheskikh podkhodakh k analizu variabel'nosti serdechnogo ritma [Elektronnyi resurs] [On the question of methodological approaches to the analysis of heart rate variability]. «Pedagogiko-psikhologicheskie i mediko-biologicheskie problemy fizicheskoi kul'tury i sporta» *Elektronnyi zhurnal Kamskogo gos.i-ta fiz.kul'tury [Pedagogical-psychological and medico-biological problems of physical culture and sports]*, 2008, vol. 1, no. 6, pp. 1–17.
25. Shlyk N.I., Sapozhnikova E.N. Analiz variabel'nosti serdechnogo ritma i dispersionnogo kartirovaniya EKG u uchastnikov paralel'nykh issledovaniy «Mars-500» s raznymi preobladayushchimi tipami vegetativnoi regulyatsii (Izhevskaya eksperimental'naya gruppy) [Analysis of heart rate variability and dispersive mapping of ECG of participants of parallel researches «Mars-500» with different dominant types of vegetative regulation]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta, seriya «Biologiya. Nauki o Zemle» [Bulletin of Udmurt University, series «Biology. Earth science»]*, 2012, no. 1, pp. 109–113.
26. Stenfors C.U., Hanson L.M., Theorell T., Osika W.S. Executive Cognitive Functioning and Cardiovascular Autonomic Regulation in a Population-Based Sample of Working Adults // *Front Psychol*, 2016, vol. 7, pp. 1–13. doi: 10.3389/fpsyg.2016.01536
27. Takada M., Ebara T., Sakai Y., Kuwano Y. Stationarity of the heart rate variability by acceleration plethysmography: short-term measurements of healthy young males in daily life. *J Hum Ergol (Tokyo)*, 2009, vol. 38, no. 2, pp. 41–50.
28. Taylor L., Watkins S.L., Marshall H., Dascombe B.J., Foster J. The Impact of Different Environmental Conditions on Cognitive Function: A Focused Review. *Front Physiol*, 2016, vol. 6, pp. 1–12. doi: 10.3389/fphys.2015.00372
29. Thayer J.F., Lane R.D. Claude Bernard and the heart-brain connection: further elaboration of a model of neurovisceral integration. *Neurosci Biobehav Rev*, 2009, vol. 33, no. 2, pp. 81–88. doi: 10.1016/j.neubiorev.2008.08.004
30. Tsunoda K., Chiba A., Chigira H., Yoshida K., Watanabe T., Mizuno O. Online estimation of a cognitive performance using heart rate variability. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 2016, pp. 761–765. doi: 0.1109/EMBC.2016.7590813
31. Usenko A.B., Kuz'mina K.A. Osobennosti proizvol'noi samoregulyatsii povedeniya mladshikh podrostkov s raznymi tipami vegetativnogo reagirovaniya [Peculiarities of voluntary self-regulation in junior adolescents with different types of autonomic nervous system response]. *Psikhologicheskie issledovaniya [Psychological research]*, 2012, vol. 5, no. 24, pp. 1–18.