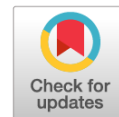


УДК 612.824+612.172.2]:612.821-055.1

DOI: <https://doi.org/10.17816/PAVLOVJ109281>

Особенности гемодинамики головного мозга и variability сердечного ритма у молодых мужчин при выполнении моделируемой когнитивной деятельности с неодинаковой результативностью

П. А. Кулагин✉, М. М. Лапкин, Е. А. Трутнева

Рязанский государственный медицинский университет имени академика И. П. Павлова, Рязань, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Целенаправленная когнитивная деятельность человека зависит от кровоснабжения клеток коры головного мозга (ГМ), а также от её вегетативного обеспечения.

Цель. Выявить особенности гемодинамики ГМ и variability сердечного ритма (ВРС) у молодых мужчин, выполняющих когнитивные задачи с неодинаковой результативностью.

Материалы и методы. В исследовании приняли участие 42 практически здоровых молодых мужчины (средний возраст $19,40 \pm 1,20$ года). Гемодинамику ГМ изучали с использованием реографа Рео-Спектр-2 (ООО Нейрософт, Россия) в исходном состоянии относительного покоя и во время моделирования целенаправленной когнитивной деятельности. Синхронно с записью реоэнцефалограммы проводили регистрацию ритмокардиограммы с помощью аппаратно-программного комплекса Варикард 2.51 (ООО Рамена, Россия). Целенаправленную когнитивную деятельность реализовывали при помощи программы для проведения психофизиологических исследований Физиотест с использованием поведенческой модели: тест «Таблицы Шульте» в двухцветной модификации «Шульте–Горбова». При статистической обработке данных использовались кластерный и корреляционный анализ.

Результаты. По показателям результативности теста «Таблицы Шульте–Горбова» выборка испытуемых была разделена на два кластера ($n = 28$ и $n = 14$). При сравнении кластеров в исходном состоянии относительного покоя и во время когнитивной деятельности были выявлены различия по реоэнцефалографическим показателям, что отражает неодинаковый характер гемодинамического обеспечения ГМ у представителей данных кластеров. Выявлены различия по показателям ВРС, отражающие отличия в уровне напряженности функционирования адаптационных механизмов как в исходном состоянии, так и во время когнитивной деятельности. Результаты корреляционного анализа продемонстрировали неодинаковую зависимость между показателями реоэнцефалограммы, ВРС и показателями результативности выполнения теста «Шульте–Горбова» у представителей разных кластеров.

Выводы. «Высокорезультативные» испытуемые характеризуются меньшим временем распространения реографической волны и большим временем медленного кровенаполнения в бассейне правой вертебральной артерии, а также большим коэффициентом асимметрии реографического индекса в бассейне левой внутренней сонной артерии и бассейне вертебральных артерий обоих полушарий во время когнитивной деятельности по сравнению с «низкорезультативными» испытуемыми. Физиологическое обеспечение целенаправленной деятельности человека с неодинаковой результативностью решения когнитивных задач характеризуется не только различными уровнями показателей гемодинамики ГМ и активности регуляторных механизмов автономной нервной системы, но и определенным характером корреляционных взаимосвязей данных показателей с параметрами целенаправленного поведения, в частности, с общим временем выполнения задания и коэффициентом полезного действия.

Ключевые слова: целенаправленное поведение; результативность решения когнитивной задачи; реоэнцефалография; кардиоинтервалография; кластерный анализ; корреляционный анализ

Для цитирования:

Кулагин П.А., Лапкин М.М., Трутнева Е.А. Особенности гемодинамики головного мозга и variability сердечного ритма у молодых мужчин при выполнении моделируемой когнитивной деятельности с неодинаковой результативностью // Российский медико-биологический вестник имени академика И. П. Павлова. 2023. Т. 31, № 1. С. 79–88. DOI: <https://doi.org/10.17816/PAVLOVJ109281>

Рукопись получена: 10.07.2022

Рукопись одобрена: 04.10.2022

Опубликована: 31.03.2023



DOI: <https://doi.org/10.17816/PAVLOVJ109281>

Peculiarities of Brain Hemodynamics and Heart Rhythm Variability in Young Men in Performing Modeled Cognitive Activity with Unequal Effectiveness

Pavel A. Kulagin✉, Mikhail M. Lapkin, Elena A. Trutneva

Ryazan State Medical University, Ryazan, Russian Federation

ABSTRACT

INTRODUCTION: Purposeful cognitive brain activity of an individual depends on blood supply to the cells of the cerebral cortex (CC), and on their autonomic innervation.

AIM: To identify peculiarities of the brain hemodynamics and heart rhythm variability (HRV) in young men performing cognitive tasks with unequal effectiveness.

MATERIALS AND METHODS: The study involved 42 practically healthy young men (mean age 19.40 ± 1.20 years). The brain hemodynamics was studied using Reo-Spektr-2 rheograph (Neurosoft, Russia) in the initial condition of relative rest and in modeled purposeful cognitive activity. Synchronously with record of rheoencephalogram, rhythmocardiogram was recorded using Varicard 2.51 hardware-software complex (Ramena, Russia). Purposeful cognitive activity was modeled in Physiotest program for psychophysiological studies with use of behavioral model: Schulte Table Test in a two-color Schulte–Gorbov modification. In statistical data processing, cluster and correlation analyses were used.

RESULTS: Based on the effectiveness of Schulte–Gorbov Table Test, the sample of subjects was divided to two clusters ($n = 28$ and $n = 14$). Comparison of clusters in the initial condition of relative physiological rest and during cognitive activity revealed differences in rheoencephalographic parameters, which reflects unequal hemodynamic supply of the brain in representatives of the given clusters. Differences in HRV parameter were found reflecting the different levels of tension of adaptation mechanisms in the initial condition and in cognitive activity. The results of the correlation analysis demonstrated different dependence between the parameters of rheoencephalogram, HRV and parameters of the effectiveness of Schulte–Gorbov Test in representatives of different clusters.

CONCLUSIONS: (1) 'High-effective' subjects are characterized by shorter time of propagation of the rheographic wave and longer time of slow blood filling of the right vertebral artery basin, and by higher rheographic index asymmetry coefficient in the basin of the left internal carotid artery and of vertebral arteries of both hemispheres during cognitive activity compared to 'low-effective' subjects. (2) Physiological support of purposeful activity of an individual with unequal effectiveness of salvation of cognitive tasks is characterized not only by different levels of brain hemodynamics and activity of autonomic regulatory mechanisms, but also by certain type of correlation relationships of these parameters with parameters of purposeful behavior, in particular, with the total time of fulfilment of the task and efficiency coefficient.

Keywords: *purposeful behavior; effectiveness of salvation of cognitive task; rheoencephalography; cardiointervalography; cluster analysis; correlation analysis*

For citation:

Kulagin PA, Lapkin MM, Trutneva EA. Peculiarities of Brain Hemodynamics and Heart Rhythm Variability in Young Men in Performing Modeled Cognitive Activity with Unequal Effectiveness. *I. P. Pavlov Russian Medical Biological Herald*. 2023;31(1):79–88. DOI: <https://doi.org/10.17816/PAVLOVJ109281>

Received: 10.07.2022

Accepted: 04.10.2022

Published: 31.03.2023

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

AA — отношение амплитуды максимального систолического значения венозной компоненты к максимальной амплитуде волны
 BCP — вариабельность сердечного ритма
 КПД — коэффициент полезного действия
 MB — мощность выполнения
 OB — общее время выполнения
 PЭГ — реоэнцефалография
 CB — среднее время выбора числа
 y.e. — условные единицы
 DIA — diastolic index (диастолический индекс)
 Fmd — right fronto-mastoidal lead (правое фронто-мастоидальное отведение)
 Fms — left fronto-mastoidal lead (левое фронто-мастоидальное отведение)
 HR — heart rate (частота сердечных сокращений)
 Omd — right occipito-mastoidal lead (правое окципито-мастоидальное отведение)
 Oms — left occipito-mastoidal lead (левое окципито-мастоидальное отведение)

pHF — power of the spectrum in the high frequency range (мощность спектра в высокочастотном диапазоне)
 pLF — power of the spectrum in the low frequency range (мощность спектра в низкочастотном диапазоне)
 pVLF — the power of the spectrum in the ultra-low frequency range (мощность спектра в сверхнизкочастотном диапазоне)
 RI — rheographic index (реографический индекс)
 SI — stress index (стресс-индекс)
 a — время восходящей части волны
 a1 — время быстрого кровенаполнения
 a2 — время медленного кровенаполнения
 D — дикротический индекс
 K — коэффициент асимметрии реографического индекса
 pvo — показатель венозного оттока
 Q_x — время распространения реографической волны
 V_{av} — средняя скорость медленного наполнения
 V_{max} — максимальная скорость быстрого наполнения

ВВЕДЕНИЕ

Одной из задач современной физиологии поведения человека является изучение роли физиологического обеспечения его целенаправленной деятельности в формировании неодинаковой ее результативности [1–3].

Когнитивная деятельность человека непосредственно связана с функционированием клеток коры больших полушарий головного мозга, адекватная жизнедеятельность которых зависит от уровня кровоснабжения [4, 5]. Широко известным неинвазивным недорогим методом исследования регионарного мозгового кровообращения является реоэнцефалография (PЭГ) [6–8].

Кроме того, согласно современным данным, немаловажными факторами, влияющими на результативность целенаправленной деятельности человека, являются её вегетативное обеспечение и физиологическая стоимость, отражающая затраты физиологических ресурсов [9–11]. Одним из методов, применяемых для оценки физиологической стоимости деятельности человека, является математический анализ ритма сердца с оценкой его вариабельности [12]. Вариабельность сердечного ритма (BCP) может служить показателем напряженности функционирования адаптационных механизмов при реализации различных форм поведения, осуществляющихся с различной результативностью [13, 14].

Цель — выявить особенности гемодинамики головного мозга и вариабельности сердечного ритма у молодых мужчин, выполняющих когнитивные задачи с неодинаковой результативностью.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании добровольно приняли участие 50 практически здоровых молодых мужчин. Все участники

дали письменное информированное согласие на участие в исследовании, исследование одобрено Локальным этическим комитетом Рязанского государственного медицинского университета им. акад. И. П. Павлова (Протокол № 2 от 07.10.2020). **Критерием исключения** было отклонение показателей PЭГ от среднего значения более 2 стандартных отклонений ($M \pm 2SD$). Этот критерий привел к формированию окончательной выборки из 42 субъектов мужского пола в возрасте от 18 до 23 лет (средний возраст $19,40 \pm 1,20$ года).

Гемодинамику головного мозга изучали в первой половине дня в положении испытуемого сидя с использованием компьютерного многофункционального реографа Рео-Спектр-2 (ООО Нейрософт, Россия) в исходном состоянии относительного покоя и во время моделирования целенаправленной когнитивной деятельности. Положение головы, шеи и туловища испытуемых контролировалось и не изменялось на протяжении всего исследования. Реоэнцефалограмму регистрировали в фронто-мастоидальных отведениях слева (Fms) и справа (Fmd) и в окципито-мастоидальных отведениях слева (Oms) и справа (Omd), что позволило оценить состояние кровотока в бассейнах внутренних сонных и позвоночных артерий [15]. Анализ и расшифровка полученных данных проводились автоматически с использованием программного обеспечения Рео-Спектр.NET (ООО Нейрософт, Россия). В анализе использовали следующие показатели PЭГ:

- время распространения реографической волны (Q_x , с);
- время быстрого кровенаполнения (a_1 , с);
- время медленного кровенаполнения (a_2 , с);
- время восходящей части волны (a , с);
- реографический индекс (RI, условные единицы (y.e.));

- коэффициент асимметрии реографического индекса (K, %);
- максимальная скорость быстрого наполнения (V_{max} , Ом/с);
- средняя скорость медленного наполнения (V_{av} , Ом/с);
- дикротический индекс (D, %);
- диастолический индекс (DIA, %);
- отношение амплитуды максимального систолического значения венозной компоненты к максимальной амплитуде волны (AA, %);
- показатель венозного оттока (p_{vo} , %).

Синхронно с записью реоэнцефалограммы проводили регистрацию ритмокардиограммы с помощью аппаратно-программного комплекса Варикард 2.51 (ООО Рамена, Россия). Обработка и анализ ритмокардиограмм проводились с помощью прилагаемого программного обеспечения ИСКИМ 6.1 по следующим показателям:

- частота сердечных сокращений (HR, 1/мин);
- стресс-индекс (SI, у.е.);
- спектральные характеристики кривой, огибающей динамический ряд кардиоинтервалов:
 - мощность спектра в высокочастотном диапазоне (pHF, %);
 - мощность спектра в низкочастотном диапазоне (pLF, %);
 - мощность спектра в сверхнизкочастотном диапазоне (pVLF, %).

Продолжительность регистрации РЭГ и ритмокардиограммы в исходном состоянии относительного покоя составляла 5 минут; во время моделирования целенаправленной когнитивной деятельности — ограничивалась временем выполнения когнитивной задачи и составляла в среднем $2,20 \pm 0,90$ минуты.

Целенаправленную когнитивную деятельность реализовывали при помощи программы для проведения психофизиологических исследований в системе «Физиотест» (Россия) [16] с использованием поведенческой модели: тест «Таблицы Шульте» в двухцветной модификации «Шульте–Горбова». Для анализа показателей результативности когнитивной деятельности использовали следующие параметры:

- общее время выполнения (ОВ, с);
- среднее время выбора числа (СВ, с);
- коэффициент полезного действия (КПД, %, рассчитывается по формуле: $KPD = ((\text{всего предъявленных чисел} - \text{количество ошибок}) / (\text{всего предъявленных чисел}))$);
- мощность выполнения (МВ, у.е., рассчитывается по формуле: $MB = (KPD * \text{общее время выполнения}) / (60 \text{ с})$).

Накопление, корректировку и первичную описательную статистическую обработку исходных данных осуществляли с помощью табличного процессора Microsoft Office Excel 2016 (Microsoft, США). Статистический анализ проводили с использованием

программы STATISTICA 13 (Stat Soft Inc., США, лицензия JPZ811I521319AR25ACD-W). Визуализацию полученных результатов осуществляли с использованием программы GraphPadPrism 8.0.1 (GraphPad Software Inc., США). Количественные показатели оценивали на предмет соответствия нормальному распределению с помощью критерия Шапиро–Уилка. В связи с отсутствием признаков нормального распределения данных использовали непараметрические статистические методы. Для выявления однородных групп по критерию различной результативности когнитивной деятельности использовали кластерный анализ. Для проверки различий между двумя сравниваемыми парными выборками применяли W-критерий Уилкоксона. Для сравнения независимых совокупностей (групп) использовали U-критерий Манна–Уитни. С целью изучения взаимосвязи между показателями был проведен корреляционный анализ с использованием метода ранговой корреляции Спирмена. Данные представлены в виде медианы (Me), нижнего (LQ) и верхнего (UQ) квартилей. Критическим уровнем значимости считали $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По показателям результативности теста «Таблицы Шульте–Горбова» выборка испытуемых была разделена на 2 кластера (рис. 1а) с использованием кластерного анализа при помощи метода k-средних: кластер 1 ($n = 28$) и кластер 2 ($n = 14$). При сравнении кластеров по параметрам результативности статистически подтверждены различия по всем критериям (рис. 1б).

У испытуемых первого кластера при реализации когнитивной деятельности по сравнению с исходным фоном наблюдается уменьшение времени быстрого кровенаполнения в отведениях Fmd, Fms, Oms; уменьшение времени медленного кровенаполнения в Oms отведении; снижение реографического индекса в Oms отведении; снижение средней скорости медленного наполнения в Omd отведении (рис. 2).

У представителей второго кластера во время когнитивной деятельности наблюдается уменьшение времени распространения реографической волны в Fmd и Omd отведениях; увеличение диастолического индекса в Oms отведении; уменьшение времени медленного кровенаполнения в Omd и Oms отведениях (рис. 3).

При сравнении кластеров по показателям гемодинамики головного мозга в исходном состоянии относительного покоя и во время когнитивной деятельности были выявлены различия по ряду показателей РЭГ (табл. 1).

У субъектов, входящих в первый кластер, по отношению ко второму наблюдается меньшее время распространения реографической волны в покое во всех четырех отведениях, а также в отведении Omd во время когнитивной деятельности; большее

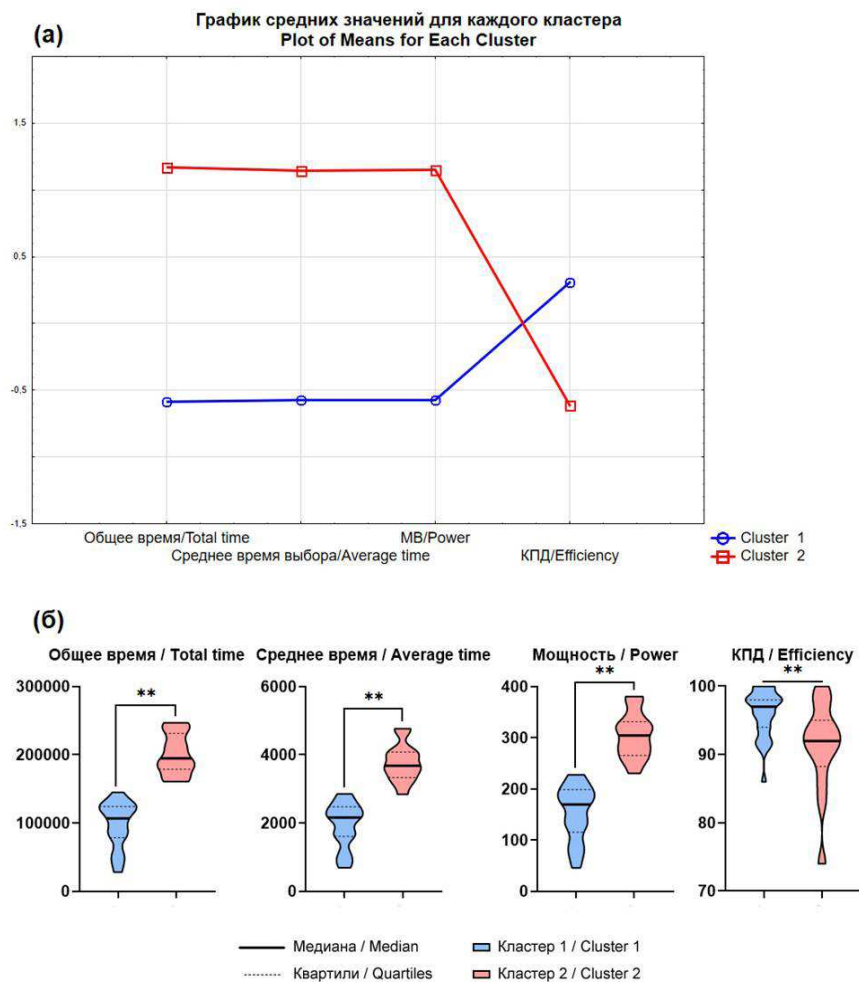


Рис. 1. Сравнение кластеров по показателям результативности выполнения теста «Шульте–Горбова».
 Примечания: ** — $p < 0,01$ для теста Манна–Уитни; КПД — коэффициент полезного действия; МВ — мощность выполнения.

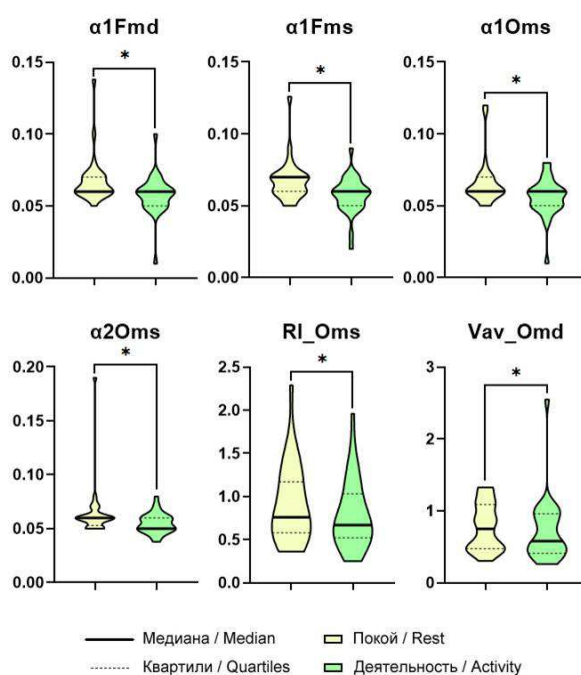


Рис. 2. Динамика результатов реоэнцефалографии у представителей 1 кластера при выполнении теста «Шульте–Горбова» по сравнению с исходным фоном.
 Примечания: $\alpha 1$ — время быстрого кровенаполнения; $\alpha 2$ — время медленного кровенаполнения; RI — реографический индекс; V_{av} — средняя скорость медленного наполнения; Fms — левое фронтально-мастоидальное отведение; Fmd — правое фронтально-мастоидальное отведение; Oms — левое окципитально-мастоидальное отведение; Omd — правое окципитально-мастоидальное отведение; * — $p < 0,05$ — для W-критерия Уилкоксона.

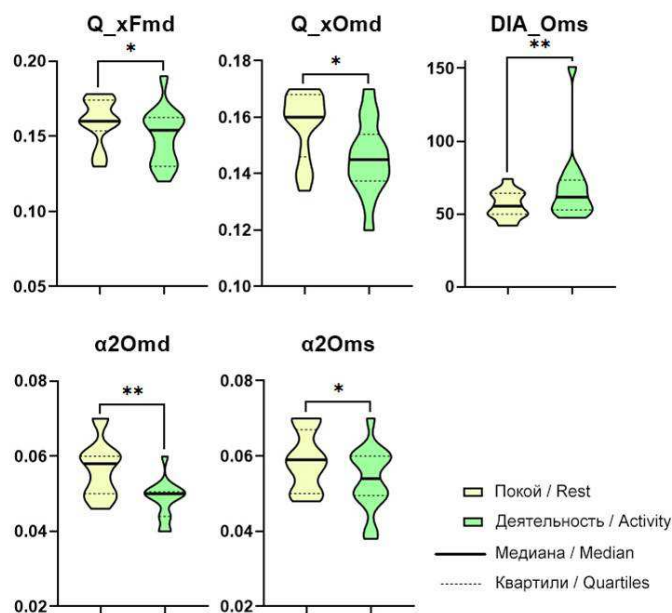


Рис. 3. Динамика результатов реоэнцефалографии у представителей 2 кластера при выполнении теста «Шульте–Горбова» по сравнению с исходным фоном.

Примечания: $\alpha 1$ — время быстрого кровенаполнения; $\alpha 2$ — время медленного кровенаполнения; RI — реографический индекс; V_{av} — средняя скорость медленного наполнения; Fms — левое фронтально-мастоидальное отведение; Fmd — правое фронтально-мастоидальное отведение; Oms — левое окципитально-мастоидальное отведение; Omd — правое окципитально-мастоидальное отведение; * — $p < 0,05$ — для W-критерия Уилкоксона.

Таблица 1. Исходные межкластерные различия показателей реоэнцефалографии в состоянии покоя и во время когнитивной деятельности (Me (LQ; HQ))

Состояние	Показатель	Кластер 1	Кластер 2	p
	n	28	14	
Исходный фон	Q_xFmd	0,15 (0,13; 0,16)	0,16 (0,16; 0,17)	0,00765
	Q_xFms	0,14 (0,13; 0,16)	0,17 (0,16; 0,17)	0,00886
	Q_xOmd	0,14 (0,13; 0,16)	0,16 (0,15; 0,17)	0,01165
	Q_xOms	0,13 (0,13; 0,15)	0,16 (0,15; 0,16)	0,00689
	$\alpha 1$ Fms	0,07 (0,06; 0,07)	0,06 (0,05; 0,07)	0,03399
	$\alpha 1$ Omd	0,06 (0,05; 0,07)	0,05 (0,05; 0,06)	0,01289
	$\alpha 1$ Oms	0,06 (0,06; 0,07)	0,06 (0,05; 0,06)	0,04572
	DiaOms	65,00 (58,75; 75,25)	55,50 (50,00; 63,75)	0,00526
Когнитивная деятельность	Q_xOmd	0,13 (0,12; 0,14)	0,15 (0,14; 0,15)	0,02525
	$\alpha 2$ Omd	0,06 (0,05; 0,07)	0,05 (0,05; 0,05)	0,00605
	KFms	26,50 (10,75; 37,00)	9,50 (1,50; 18,50)	0,02947
	KOmd	35,00 (16,75; 69,75)	5,50 (-2,00; 20,00)	0,00732
	KOms	35,00 (16,75; 69,75)	5,50 (1,25; 22,25)	0,03065

время быстрого кровенаполнения в отведениях Fms, Omd, Oms в покое; большее время медленного кровенаполнения в отведении Omd во время когнитивной деятельности; большой диастолический индекс в отведении Oms в покое; а также большой коэффициент асимметрии реографического индекса в отведениях

Fms, Omd, Oms во время когнитивной деятельности.

При анализе кардиоритмограмм обнаружено, что показатель SI в исходном состоянии и во время когнитивной деятельности и показатель rLF во время когнитивной деятельности у представителей первого кластера ниже, чем у представителей второго кластера (рис. 4).

Различия в характере и выраженности корреляционных связей между показателями целенаправленной деятельности и ее физиологическим

обеспечением у испытуемых 1 и 2 кластеров представлены в виде корреляционных плеяд (рис. 5).

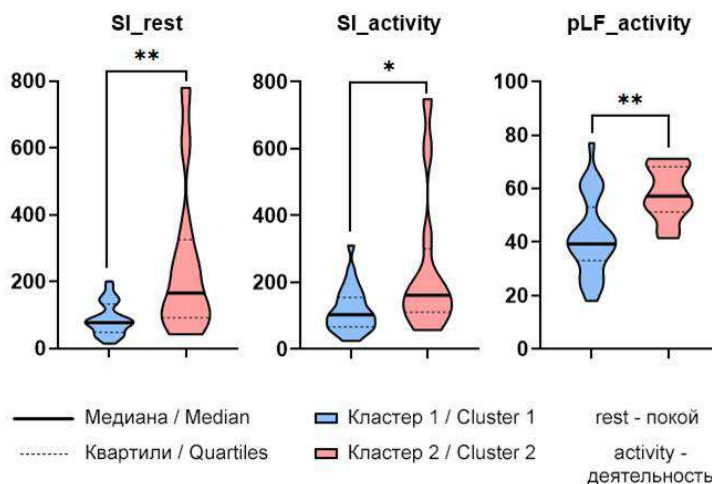


Рис. 4. Межкластерный сравнительный анализ показателей variability сердечного ритма.
Примечания: SI — стресс-индекс; pLF — мощность спектра в низкочастотном диапазоне; * — $p < 0,05$, ** — $p < 0,01$ для U-теста Манна–Уитни.

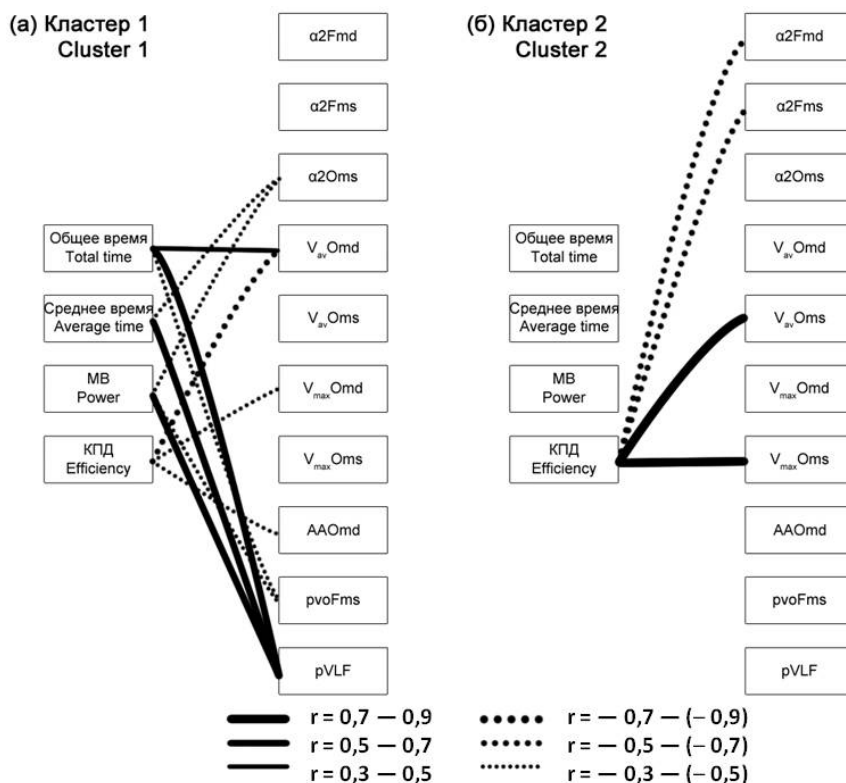


Рис. 5. Корреляционные плеяды, отражающие взаимосвязи показателей реоэнцефалографии и variability сердечного ритма с показателями результативности когнитивной деятельности испытуемых сравниваемых кластеров.

Примечания: Сплошной линией обозначены положительные («прямые») взаимосвязи, пунктирной линией обозначены отрицательные («обратные») взаимосвязи. Толщина линии соответствует силе корреляционной связи (по шкале Чеддока [17]). AA — отношение амплитуды максимального систолического значения венозной компоненты к максимальной амплитуде волны; pvo — показатель венозного оттока; МВ — мощность выполнения; КПД — коэффициент полезного действия; Fms — левое фронто-мастоидальное отведение; Fmd — правое фронто-мастоидальное отведение; Oms — левое окципито-мастоидальное отведение; Omd — правое окципито-мастоидальное отведение; $\alpha 2$ — время медленного кровенаполнения; V_{av} — средняя скорость медленного наполнения; V_{max} — максимальная скорость быстрого наполнения.

ОБСУЖДЕНИЕ

В проведенном исследовании испытуемые первого кластера характеризуются меньшим общим временем выполнения теста, меньшим средним временем выбора числа, меньшей мощностью выполнения и более высоким КПД по сравнению с испытуемыми второго кластера, что может охарактеризовать первых как «высокорезультативных». Представителей второго кластера можно рассматривать как «низкорезультативных» при решении данной когнитивной задачи.

При сравнении гемодинамических показателей, зарегистрированных в различных условиях, выявлены достоверные изменения в обоих кластерах. Однако характер сдвигов различается. Общим изменением является уменьшение времени медленного кровенаполнения в окципито-мастоидальном отведении слева ($\alpha 20ms$), что, вероятно, обусловлено изменением тонуса сосудов среднего и малого калибра в левой вертебробазиллярной области. Идентичное явление находит свое подтверждение в работах других авторов [18].

При сравнении кластеров в исходном состоянии относительного покоя и во время когнитивной деятельности были выявлены достоверные различия по ряду показателей РЭГ, что отражает неодинаковый характер гемодинамического обеспечения головного мозга у представителей данных кластеров. Меньшее время распространения реографической волны в покое во всех четырех отведениях и в отведении Omd во время когнитивной деятельности у субъектов первого кластера, вероятно, связано с более высоким тонусом экстракраниальных сосудов. Большее время быстрого кровенаполнения у представителей первого кластера в отведениях Fms, Omd, Oms в состоянии покоя может отражать большую упругость стенок крупных церебральных артерий: левой внутренней сонной артерии и позвоночных артерий. Также стоит отметить, что «высокорезультативные» испытуемые характеризуются большим коэффициентом асимметрии реографического индекса во время нагрузки, что является показателем значительной асимметрии кровенаполнения ($K > 26\%$). Однако в ряде предыдущих работ было продемонстрировано, что асимметрия кровенаполнения наблюдается у испытуемых с низкой результативностью выполнения когнитивной задачи на модели Струп-теста [4, 5], что не согласуется с результатами нашего исследования и подтверждает необходимость проведения дальнейших исследований в этой области на различных поведенческих моделях.

Полученные результаты также свидетельствуют о возможности параметрирования мозгового кровотока с применением высокочастотного зондирующего тока, используемого в РЭГ-исследованиях.

Выявленные различия по показателям ВСП демонстрируют, что у представителей кластера 1 наблюдается

более низкий уровень напряженности регуляторных механизмов симпатического отдела автономной нервной системы как в исходном состоянии, так и во время когнитивной деятельности. Высокие значения rLF во время когнитивной деятельности у представителей кластера 2 показывают, по-видимому, относительно более высокую активность симпатического отдела автономной нервной системы.

Результаты корреляционного анализа отражают неодинаковую зависимость между показателями РЭГ, ВСП и показателями результативности выполнения теста «Шульте-Горбова» у представителей разных кластеров. Стоит отметить особенности связей показателей максимальной скорости быстрого наполнения (V_{max} , отражает тонус крупных артерий) и средней скорости медленного наполнения (V_{av} , отражает тонус средних и мелких артерий) с показателем КПД. В кластере 1 обнаружена слабая отрицательная связь между показателями V_{max} Omd и КПД ($r = -0,38$) и средняя по силе отрицательная связь между показателями V_{av} Omd и КПД ($r = -0,56$). У представителей кластера 2 выявлена положительная связь высокой силы между показателями V_{max} Oms и КПД ($r = 0,71$) и положительная связь высокой силы между показателями V_{av} Oms и КПД ($r = 0,72$). Также стоит выделить наличие прямой взаимосвязи средней скорости медленного наполнения в окципито-мастоидальном отведении справа (V_{av} Omd) с общим временем выполнения теста «Шульте-Горбова» ($r = 0,39$) у представителей «высокорезультативного» кластера. Указанный показатель у испытуемых данного кластера достоверно снижается во время выполнения теста по сравнению с исходным фоном. Примечательно, что в работе E. S. Olenko, et al. (2021) также выявлены прямые взаимосвязи показателя V_{av} с временем выполнения теста Струпа, но эти связи были обнаружены с показателем V_{av} , зарегистрированным в фронтально-мастоидальных отведениях слева и справа (V_{av} Fms и V_{av} Fmd соответственно) у лиц с низкой результативностью выполнения когнитивной задачи [5].

ВЫВОДЫ

1. Результативность когнитивной деятельности человека связана с особенностями мозговой гемодинамики, в частности, с изменением скоростных характеристик кровенаполнения: максимальной скорости быстрого наполнения и средней скорости медленного наполнения, а также с особенностями вегетативной регуляции деятельности сердца.

2. «Высокорезультативные» испытуемые характеризуются меньшим временем распространения реографической волны и большим временем медленного кровенаполнения в бассейне правой вертебральной артерии, а также большим коэффициентом асимметрии реографического индекса в бассейне левой внутренней сонной

артерии и бассейне вертебральных артерий обоих полушарий во время когнитивной деятельности по сравнению с «низкорезультативными» испытуемыми.

3. Физиологическое обеспечение целенаправленной деятельности человека с неодинаковой результативностью решения когнитивных задач характеризуется не только различными уровнями показателей гемодинамики головного мозга и активности регуляторных механизмов автономной нервной системы, но и определенным характером корреляционных взаимосвязей данных показателей с параметрами целенаправленного поведения, в частности, с общим временем выполнения задания и коэффициентом полезного действия.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Финансирование. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Джебраилова Т.Д., Коробейникова И.И., Дудник Е.Н., и др. Вегетативные корреляты индивидуальных различий временных параметров и результативности интеллектуальной деятельности человека // Физиология человека. 2013. Т. 39, № 1. С. 94–102. doi: [10.7868/S0131164613010037](https://doi.org/10.7868/S0131164613010037)
2. Бирюкова Е.В., Василюк Н.А., Андрианов В.В. Гендерные особенности вариабельности сердечного ритма и гемодинамического обеспечения учебной деятельности студентов // Российский медико-биологический вестник имени академика И. П. Павлова. 2019. Т. 27, № 2. С. 188–196. doi: [10.23888/PAVLOVJ2019272188-196](https://doi.org/10.23888/PAVLOVJ2019272188-196)
3. Fan X., Zhao C., Zhang X., et al. Assessment of mental workload based on multi-physiological signals // *Technology and Health Care*. 2020. Vol. 28, No. S1. P. 67–80. doi: [10.3233/THC-209008](https://doi.org/10.3233/THC-209008)
4. Оленко Е.С., Киричук В.Ф., Кодочигова А.И., и др. Особенности состояния мозговой гемодинамики у молодых мужчин в зависимости от их когнитивной функции // Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова. 2020. Т. 70, № 1. С. 25–30. doi: [10.31857/S0044467720010128](https://doi.org/10.31857/S0044467720010128)
5. Olenko E.S., Fomina E.V., Kodochigova A.I., et al. Correlation of functional disorders in cerebral blood flow with cognitive style of freshmen students // *Russian Open Medical Journal*. 2021. Vol. 10, No. 3. P. e0308. doi: [10.15275/rusomj.2021.0308](https://doi.org/10.15275/rusomj.2021.0308)
6. Яруллин Х.Х. Клиническая реоэнцефалография. М.: Медицина; 1983.
7. Brady K.M., Mytar J.O., Kibler K.K., et al. Monitoring cerebrovascular pressure reactivity with rheoencephalography // *Journal of Physics: Conference Series*. 2010. Vol. 224, No. 1. P. 012089. doi: [10.1088/1742-6596/224/1/012089](https://doi.org/10.1088/1742-6596/224/1/012089)
8. Bodó M. A noninvasive, continuous brain monitoring method: rheoencephalography (REG) // *DRC Sustainable Future*. 2020. Vol. 1, No. 2. P. 103–119. doi: [10.37281/1.2.3](https://doi.org/10.37281/1.2.3)
9. Зорин Р.А., Медведева Ю.И., Курепина И.С., и др. Вегетативное обеспечение целенаправленной деятельности и её результативность у практически здоровых лиц // Наука молодых (Eruditio Juvenium). 2019. Т. 7, № 1. С. 38–45. doi: [10.23888/HMJ20197138-45](https://doi.org/10.23888/HMJ20197138-45)
10. Меркулова М.А., Лапкин М.М. Физиологическая стоимость как фактор, определяющий результативность деятельности у человека

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов: Кулагин П. А. — сбор и статистическая обработка материала, написание текста статьи; Лапкин М. М. — концепция и дизайн исследования, редактирование; Трутнева Е. А. — дизайн исследования, коррекция методов исследования. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Funding. This study was not supported by any external sources of funding.

Conflict of interests. The authors declares no conflicts of interests.

Contribution of the authors: P. A. Kulagin — collection and statistical analysis of material, writing the text of the article; M. M. Lapkin — research concept and design, editing; E. A. Trutneva — research design, correction of research methods. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

при воспроизведении зрительных образов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Медицина. 2020. Т. 24, № 3. С. 253–261. doi: [10.22363/2313-0245-2020-24-3-253-261](https://doi.org/10.22363/2313-0245-2020-24-3-253-261)

11. Клименко А.В., Перцов С.С., Яковенко И.Ю., и др. Физиологическая цена целенаправленной деятельности у людей с разной результативностью динамике эндохирургического тренинга // Российский медико-биологический вестник имени академика И.П. Павлова. 2019. Т. 27, № 3. С. 333–341. doi: [10.23888/PAVLOVJ2019273333-341](https://doi.org/10.23888/PAVLOVJ2019273333-341)

12. Зорин Р.А., Медведева Ю.И., Курепина И.С., и др. Распределение физиологических ресурсов и эффективность целенаправленной деятельности у больных эпилепсией // Российский медико-биологический вестник имени академика И. П. Павлова. 2018. Т. 26, № 3. С. 369–379. doi: [10.23888/PAVLOVJ2018263369-379](https://doi.org/10.23888/PAVLOVJ2018263369-379)

13. Баевский Р.М., Иванов Г.Г. Вариабельность сердечного ритма: теоретические аспекты и возможности клинического применения // Ультразвуковая и функциональная диагностика. 2001. № 3. С. 108–127.

14. Баевский Р.М. Проблема оценки и прогнозирования функционального состояния организма и ее развитие в космической медицине // Успехи физиологических наук. 2006. Т. 37, № 3. С. 42–57.

15. Фомина Е.В., Оленко Е.С., Киричук В.Ф., и др. Состояние мозговой гемодинамики у молодых мужчин с разными показателями адаптационных резервов организма // Современные вопросы биомедицины. 2021. Т. 5, № 3. С. 142–158. doi: [10.51871/2588-0500_2021_05_03_12](https://doi.org/10.51871/2588-0500_2021_05_03_12)

16. Лапкин М.М., Алпатов А.В., Зорин Р.А., и др. Программа для проведения психофизиологических исследований «Физиотест». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ № 2020615115. 18.05.2020. Бюл. № 5. Доступно по: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2020615115&TypeFile=html. Ссылка активна на 01 июля 2022.

17. Chaddock R.E. Principles and Methods of Statistics. Houghton Mifflin; 1925.

18. Чуб И.С., Борейко А.П., Кунавин М.А., и др. Особенности мозговой гемодинамики у студентов в процессе выполнения когнитивной задачи // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2021. № 2. С. 16–20.

REFERENCES

1. Dzhebrailova TD, Korobeinikova II, Dudnik EN, et al. Autonomic correlates of individual differences in human intellectual activity. *Fiziologiya Cheloveka*. 2013;39(1):94–102. (In Russ). doi: [10.7868/S0131164613010037](https://doi.org/10.7868/S0131164613010037)
2. Biryukova EV, Vasilyuk NA, Andrianov VV. Gender peculiarities of heart rate variability and hemodynamic basis of students' educational activity. *I. P. Pavlov Russian Medical Biological Herald*. 2019;27(2):188–96. (In Russ). doi: [10.23888/PAVLOVJ2019272188-196](https://doi.org/10.23888/PAVLOVJ2019272188-196)
3. Fan X, Zhao C, Zhang X, et al. Assessment of mental workload based on multi-physiological signals. *Technology and Health Care*. 2020;28(S1):67–80. doi: [10.3233/THC-209008](https://doi.org/10.3233/THC-209008)
4. Olenko ES, Kirichuk VF, Kodochigova AI, et al. Features of the state of brain hemodynamics in young men: interaction with cognitive function. *Zhurnal Vysshey Nervnoy Deyatel'nosti imeni I.P. Pavlova*. 2020;70(1):25–30. (In Russ). doi: [10.31857/S0044467720010128](https://doi.org/10.31857/S0044467720010128)
5. Olenko ES, Fomina EV, Kodochigova AI, et al. Correlation of functional disorders in cerebral blood flow with cognitive style of freshmen students. *Russian Open Medical Journal*. 2021;10(3):e0308. doi: [10.15275/rusomj.2021.0308](https://doi.org/10.15275/rusomj.2021.0308)
6. Yarullin KhKh. *Klinicheskaya reoentsefalografiya*. Moscow: Meditsina; 1983. (In Russ).
7. Brady KM, Mytar JO, Kibler KK, et al. Monitoring cerebrovascular pressure reactivity with rheoencephalography. *Journal of Physics: Conference Series*. 2010;224(1):012089. doi: [10.1088/1742-6596/224/1/012089](https://doi.org/10.1088/1742-6596/224/1/012089)
8. Bodó M. A noninvasive, continuous brain monitoring method: rheoencephalography (REG). *DRC Sustainable Future*. 2020;1(2):103–19. doi: [10.37281/1.2.3](https://doi.org/10.37281/1.2.3)
9. Zorin RA, Medvedeva Yul, Kurepina IS, et al. The vegetative support of purposeful activity and performance efficiency in healthy people. *Nauka Molodykh (Eruditio Juvenium)*. 2019;7(1):38–45. (In Russ). doi: [10.23888/HMJ20197138-45](https://doi.org/10.23888/HMJ20197138-45)
10. Merkulova MA, Lapkin MM. Physiological cost as a factor determining the effectiveness of human activity in the visual images reproduction. *RUDN Journal of Medicine*. 2020;24(3):253–61. (In Russ). doi: [10.22363/2313-0245-2020-24-3-253-261](https://doi.org/10.22363/2313-0245-2020-24-3-253-261)
11. Klimenko AV, Pertsov SS, Yakovenko IY, et al. Physiological 'cost' of activity of individuals with different effectiveness in dynamics of endosurgical training. *I. P. Pavlov Russian Medical Biological Herald*. 2019;27(3):333–41. (In Russ). doi: [10.23888/PAVLOVJ2019273333-341](https://doi.org/10.23888/PAVLOVJ2019273333-341)
12. Zorin RA, Medvedeva YI, Kurepina IS, et al. Distribution of physiological resources and effectivity of purposeful activity of patients with epilepsy. *I. P. Pavlov Russian Medical Biological Herald*. 2018;26(3):369–79. (In Russ). doi: [10.23888/PAVLOVJ2018263369-379](https://doi.org/10.23888/PAVLOVJ2018263369-379)
13. Bayevsky RN, Ivanov GG. Cardiac Rhythm Variability: the Theoretical Aspects and the Opportunities of Clinical Application (Lecture). *Ultrasound and Functional Diagnostics*. 2001;(3):108–27. (In Russ).
14. Baevsky RM. Problem of the estimation and forecasting of the organisms functional state and its development in space medicine. *Uspekhi Fiziologicheskikh Nauk*. 2006;37(3):42–57. (In Russ).
15. Fomina EV, Olenko ES, Kirichuk VF, et al. Features of cerebral hemodynamics in young men with different conditions of adaptive reserves of the organism. *Modern Issues of Biomedicine*. 2021;5(3):142–58. (In Russ). doi: [10.51871/2588-0500_2021_05_03_12](https://doi.org/10.51871/2588-0500_2021_05_03_12)
16. Lapkin MM, Alpatov AV, Zorin RA, et al. Programma dlja provedeniya psihofiziologicheskikh issledovanij «Fiziotest». Certificate of state registration of a computer program RUS No. 2020615115. 18.05.2020. Byul. No. 5. Available at: https://www1.fips.ru/register-doc-view/fips_ser_vlet?DB=EVM&DocNumber=2020615115&TypeFile=html. Accessed: 2022 October 03. (In Russ).
17. Chaddock RE. *Principles and Methods of Statistics*. Houghton Mifflin; 1925.
18. Chub IS, Boreyko AP, Kunavin MA, et al. Features of cerebral hemodynamics in students in the process of performing a cognitive task. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2021;(2):16–20.

ОБ АВТОРАХ

*Кулагин Павел Андреевич;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5284-0875>;
eLibrary SPIN: 3623-3309; e-mail: zu.pavel@gmail.com

Лапкин Михаил Михайлович, д.м.н., профессор;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1826-8307>;
eLibrary SPIN: 5744-5369; e-mail: lapkin_rm@mail.ru

Трутнева Елена Анатольевна, к.м.н., доцент;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9273-9432>;
eLibrary SPIN: 6177-3776; e-mail: e_lena68@mail.ru

AUTHOR'S INFO

*Pavel A. Kulagin;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5284-0875>;
eLibrary SPIN: 3623-3309; e-mail: zu.pavel@gmail.com

Mikhail M. Lapkin, MD, Dr. Sci. (Med.), Professor;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1826-8307>;
eLibrary SPIN: 5744-5369; e-mail: lapkin_rm@mail.ru

Elena A. Trutneva, MD, Cand. Sci. (Med.), Associate Professor;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9273-9432>;
eLibrary SPIN: 6177-3776; e-mail: e_lena68@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author