

УДК 612.13,612.181,612.213

## ПЕРИОДИЧЕСКАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ МЕНТАЛЬНОГО ВНИМАНИЯ ИЗМЕНЯЕТ СТРУКТУРУ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЕ

© 2020 г. Г. В. Красников<sup>1, \*</sup>, М. Й. Тюрина<sup>1</sup>, Г. М. Пискунова<sup>1</sup>,  
А. И. Крупаткин<sup>2, \*\*</sup>, А. В. Танканаг<sup>3</sup>, Н. К. Чемерис<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО Тульский государственный педагогический университет  
им. Л.Н. Толстого, Тула, Россия

<sup>2</sup>ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии  
им. Н.Н. Приорова МЗ РФ, Москва, Россия

<sup>3</sup>ФГБУН ФИЦ Пушчинский научный центр биологических исследований РАН, Пушкино, Россия

\*E-mail: gvkrasnikov@gmail.com

\*\*E-mail: krup.61@mail.ru

Поступила в редакцию 14.04.2019 г.

После доработки 26.08.2019 г.

Принята к публикации 03.09.2019 г.

В условиях решения модельных задач по выявлению полезного акустического сигнала из белого шума проведено комплексное исследование влияния периодической концентрации сенсорного и моторного внимания на изменения ритмической структуры сердечного ритма и колебаний микроциркуляторного кровотока кожи. Испытуемым предлагали отслеживать низкочастотный ритм амплитудно-модулированного акустического белого шума в сериях, требующих различной степени периодической концентрации внимания. Регистрировали вариабельность сердечного ритма (ВСР), частоту и глубину экскурсий грудной клетки, объемную скорость кровотока в коже запястья и подушечке пальца и анализировали их спектральные характеристики. В исследовании принимали участие нормотензивные девушки и юноши 18–25 лет без выявленных патологий кожи, сердечно-сосудистой и дыхательной систем. В результате проведенного исследования показано, что ментальная активность в виде периодической концентрации сенсорного и моторного внимания в сочетании с произвольной периодической мышечной активностью оказывает достоверное влияние на ритмическую структуру сердечного ритма и колебаний микроциркуляторного кровотока кожи. Для колебаний сердечного ритма характерен частотно-избирательный отклик системы на воздействие с максимумом на частоте 0.1 Гц. Колебательная система микроциркуляторного кровотока демонстрирует аддитивный характер взаимодействия, что проявляется в пропорциональном увеличении амплитуды колебаний по отношению к исходному уровню на соответствующей частоте. Предполагается, что индуцированные колебания микроциркуляторного кровотока кожи в условиях периодической концентрации внимания преимущественно обусловлены центральной модуляцией нейронных (симпатических) механизмов тонуса микрососудов.

*Ключевые слова:* микроциркуляция, вариабельность сердечного ритма, лазерная доплеровская флоуметрия, ментальный контроль, центральная команда.

DOI: 10.31857/S0131164620010105

Кортико-висцеральные взаимодействия на уровне сердечно-сосудистой системы в настоящее время подтверждены многочисленными нейрофизиологическими исследованиями [1–4]. Активность коры больших полушарий играет доминирующую роль в функциональном взаимодействии между сердечно-сосудистой и дыхательной системами (кардио-респираторная синхронизация), что особенно явно проявляется в условиях нервно-психического напряжения [5–7]. Продемонстрировано участие коры больших по-

лушарий в контроле кожной и мышечной симпатической активности у человека [3, 8–11]. Показано, что корковые области, вовлеченные в висцеральные сенсорные или висцеральные моторные процессы, связанные с кровообращением, могут участвовать в осуществлении сердечно-сосудистых рефлексов, специфических для определенных поведенческих реакций, например, в состоянии стресса, эмоциональной активности [1–4, 12–15]. Произвольное сенсорное внимание также сопровождается изменениями активности вегета-

тивной нервной системы (ВНС) и, соответственно, состояния висцеральных систем [1–5, 16].

Наиболее подробно исследовано влияние центральных механизмов на сердечно-сосудистую систему при физических упражнениях, известное как “центральная команда” [8, 11, 17]. Центральная команда определяется как механизм прямой связи, включающий параллельную активацию как двигательных, так и сердечно-сосудистых центров в коре больших полушарий во время физических упражнений [5, 10, 17]. В данном контексте центральная команда представляет собой активацию областей мозга, ответственных за соматомоторную регуляцию, которые, в свою очередь, воздействуют на области контроля сердечно-сосудистой системы, опосредуя вегетативные реакции, имеющие решающее значение для регуляции сердечно-сосудистой системы во время произвольной физической активности [18, 19].

Исследования микрососудистых реакций в условиях произвольной мышечной активности демонстрируют значимую роль центральных влияний на вегетативную регуляцию микроциркуляторного кровотока. Микронейрографическими исследованиями доказано, что активация центральной команды во время нервно-мышечной блокады вызывала значительное увеличение кожной симпатической активности при незначительном увеличении мышечной симпатической активности [17, 20]. Эти данные свидетельствуют о том, что при умеренных уровнях нагрузок симпатическая активация в коже преимущественно зависит от центральной двигательной команды. Кроме того, показано, что симпатическая активность кожи более чувствительна к когнитивным процессам, таким как математические расчеты, по сравнению с симпатической активностью мышц [14, 21]. Имеются данные о том, что кожная симпатическая активность также может быть более чувствительной к центральным влияниям, сопровождающим произвольные двигательные усилия [21].

Ранее нами была продемонстрирована значимая роль механизмов симпатической регуляции в формировании респираторно-зависимых колебаний на уровне микроциркуляторного кровотока кожи при глубоком контролируемом дыхании [22, 23]. Выраженность респираторных колебаний в группе испытуемых зависела от степени преобладания тонуса симпатического отдела вегетативной нервной системы и плотности сосудистой симпатической иннервации исследуемой области кожи конечности. Однако, по-нашему мнению, помимо вазомоторных рефлексов, обусловленных респираторной модуляцией активности симпатического отдела ВНС, значимую роль в реализации респираторных эффектов на уровне периферического кровотока могут играть

центральные влияния со стороны коры больших полушарий, обусловленные произвольной активностью испытуемого в процессе контроля дыхания. Необходимость слежения за задаваемым ритмом дыхания и произвольный контроль дыхательной мускулатуры в соответствии с заданным профилем дыхания, очевидно, требует высокого уровня произвольного сенсорного и моторного внимания [22, 23]. Под сенсорным и моторным вниманием в нашем случае понимаются когнитивные усилия со стороны испытуемых, направленные на избирательное восприятие визуальных и акустических сигналов (сенсорное внимание) и осознание и регуляцию движений и действий, совершаемых испытуемым (моторное внимание) в соответствии с протоколом исследования. В этой связи можно предположить, что произвольный контроль дыхания в условиях высокой концентрации внимания сопряжен с существенным центральным влиянием как на вегетативную регуляцию сердечно-сосудистой системы в целом, так и на микроциркуляторный кровоток в частности.

Ментальная активность, вероятно, может оказывать самостоятельное влияние на вегетативную регуляцию периферического кровотока и являться фактором формирования колебаний кровотока на уровне системы микроциркуляции. Реализация центрального влияния на уровне микроциркуляторного кровотока опосредована механизмами симпатического контроля. Необходимым условием при этом будет выступать произвольная периодическая активность. Целью данного исследования являлась оценка реактивных изменений ритмической структуры колебаний сердечного ритма и периферического кровотока кожи в зависимости от уровня и частоты концентрации сенсорного и моторного внимания и регионарных особенностей регуляции периферического кровотока.

## МЕТОДИКА

В соответствии с целью исследование разделили на две части. В первой части оценивали влияние центральной команды на ВСР и микроциркуляторный кровоток кожи человека в зависимости от степени концентрации сенсорного и моторного внимания. Вторая часть была посвящена выяснению частотно-зависимых особенностей влияния центральной команды на ВСР и микроциркуляторный кровоток.

*Участники исследования.* В исследовании принимали участие нормотензивные некурящие девушки и юноши 18–25 лет без выявленных патологий кожи, сердечно-сосудистой и дыхательной систем. В первой части исследования в зависимости от серии приняли участие от 9 до 20 чел., во второй – 26 чел.

Исследования проводили в изолированном помещении в условиях психического и физического комфорта при температуре 20–24°C. Во время проведения измерений испытуемые находились в положении сидя.

**Лазерная доплеровская флоуметрия.** Регистрацию колебаний микроциркуляторного кровотока осуществляли в коже руки с помощью двухканального лазерного флоуметра ЛАКК-02 (ЛАЗМА, Россия) с двумя идентичными каналами (длина волны 0.63 мкм, мощность излучения 0.5 мВт). Зонды флоуметра располагали на ладонной поверхности дистальной фаланги II пальца кисти и наружной поверхности предплечья вблизи лучезапястного сустава левой руки. Указанные области кожи выбрали как зоны с различными доминирующими механизмами регуляции сосудистого тонуса. Кожа ладонной поверхности дистальной фаланги пальца кисти богата артериоло-венулярными анастомозами и имеет выраженную адренергическую иннервацию. Кожа наружной поверхности предплечья, напротив, характеризуется малым числом анастомозов и демонстрирует преимущественно нутритивный кровоток [24, 25]. Регистрируемый сигнал – показатель микроциркуляции (ПМ) – характеризует степень перфузии ткани кровью и измеряется в условных (перфузионных) единицах (пф. ед.). Частота дискретизации лазерной доплеровской флоуграммы (ЛДФ-граммы) составляла 16 Гц.

**Электрокардиография (ЭКГ).** Регистрацию ЭКГ в различных сериях осуществляли посредством полиграфа *CONAN-m* (*InCo*, Россия) или компьютерного электрокардиографа ВНС-Микро (ООО “Нейрософт”, Россия). Преобразование электрокардиограмм в кардиоинтервалограммы и анализ параметров частотной области ВСП выполняли на основе стандартных методик посредством Фурье-преобразования [26] в программах *Kubios HRV v. 2.0* (*BSAMIG, University of Kuopio*, Финляндия) и Поли-Спектр. *NET v. 5.2.5.0* (ООО “Нейрософт”, Россия). Оценивали относительные величины спектральной мощности в низкочастотном (*LF*, 0.04–0.15 Гц), отражающем преимущественно парасимпатическую активность и высокочастотном (*HF*, 0.15–0.4 Гц), отражающем преимущественно активность симпатoadренальной системы регуляции диапозонах, а также изменение симпатовагального статуса по величине отношения *LF/HF*.

**Пневмография.** Глубину, форму и частоту дыхательных движений регистрировали с использованием ленточного потенциометрического датчика, закрепленного на грудной клетке испытуемых. Аналоговый сигнал датчика подвергался оцифровке с частотой дискретизации 10 Гц посредством АЦП Е-154 (*L-Card*, Россия).

Для первой части исследования разработали экспериментальные процедуры, требующие различной степени периодической концентрации внимания испытуемых. Во всех сериях испытуемым предлагали определенным образом отслеживать низкочастотный ритм амплитудно-модулированного акустического белого шума. Прослушивание шума испытуемые осуществляли через наушники закрытого типа. Максимальная пиковая интенсивность шума не выходила за границы комфортного восприятия и составляла порядка 20 дБ. Глубина амплитудной модуляции шума периодическим сигналом была порядка 90%. Во всех вариантах экспериментов в первой части исследования сенсорную стимуляцию осуществляли с частотой 0.04 и 0.1 Гц. Указанные частоты амплитудной модуляции шума выбирали, как соответствующие частотам известных физиологических ритмов, регистрируемых на уровне микроциркуляторного русла кожи. Колебания с частотой порядка 0.04 Гц соответствуют колебаниям, имеющим нейрогенную (преимущественно симпатическую) природу [25]. Колебания с частотой порядка 0.1 Гц, хорошо выраженные в сигналах variability сердечного ритма, кровяного давления, динамики периферического кровотока, обусловлены барорефлекторными механизмами регуляции кровотока и спонтанной сократительной активностью гладкомышечных клеток стенок сосудов [25]. Проводили пять серий со следующими условиями.

В серии “Подсчет в уме” испытуемые должны были проявлять только сенсорное внимание и производить мысленный подсчет числа периодов модуляции шума на протяжении всего времени испытания. Следующие серии предполагали проявление сочетания сенсорного (дифференцировка максимума акустического сигнала) и моторного внимания (синхронные с акустическим сигналом действия различной степени сложности). Серия “Глаза” предполагала моторную реакцию испытуемых на звуковую стимуляцию посредством закрывания и открывания глаз. В соответствии с фазой модуляции шума испытуемым предлагали держать глаза закрытыми (фаза снижения громкости шума) или открытыми (фаза нарастания громкости шума). В серии “Метка” от испытуемых требовали следить за периодическим появлением звуковой метки и фиксировать эти моменты нажатием кнопки мыши правой рукой. В серии “Максимум” испытуемым предлагали самостоятельно определять моменты максимальной громкости шума и фиксировать их нажатием кнопки мыши. Точность обнаружения максимумов оценивали с помощью компьютерной программы и демонстрировали испытуемым в реальном времени. Испытуемые были мотивированы на выполнение задания с максимальной точностью. В серии “Рисование” испытуемым необо-

димо было на протяжении всего эксперимента при помощи компьютерной мыши “рисовать” на экране компьютера кривую, соответствующую периодическому изменению громкости модулированного шума.

Во второй части исследования для амплитудной модуляции шума использовали синусоидальные колебания с расширенным набором частот: 0.02, 0.04, 0.06, 0.08 и 0.1 Гц.

Для каждого участника синхронно регистрировали паттерн дыхания, ЭКГ и динамику микроциркуляторного кровотока кожи при естественном звуковом окружении, в условиях воздействия модулированного шума с указанными частотами, в условиях воздействия немодулированного шума (при этом уровень громкости соответствовал максимальному уровню шума в режиме амплитудной модуляции). Длительность записей во всех случаях составляла 5 мин. Между записями испытуемым предоставляли 2–3-минутные паузы.

*Анализ данных.* Для всех зарегистрированных сигналов рассчитывали амплитудно-частотные спектры на основе оригинального программного обеспечения, реализующего непрерывное адаптивное вейвлет-преобразование [27–29]. Анализировали максимальные амплитуды пиков на амплитудно-частотных спектрах сигналов на частотах, соответствовавших частотам стимуляции. Также амплитуду колебаний, индуцированных центральной командой, оценивали в относительном масштабе. Для каждого испытуемого нормировали значения амплитуды колебаний сердечного ритма, кровотока кожи предплечья и пальца на частоте модуляции шума при различной степени концентрации сенсорного и моторного внимания на соответствующую по частоте амплитуду колебаний в спектрах в состоянии покоя.

Для статистического анализа достоверности различий в связи с тем, что распределение некоторых выборок данных не являлось нормальным (критерий Шапиро–Уилка), использовали непараметрический однофакторный дисперсионный анализ для повторных измерений (критерий Фридмана), с последующим множественным попарным сравнением по критерию Тьюки. Статистически значимыми считали различия при  $p < 0.05$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

*Динамика колебаний сердечного ритма и микроциркуляторного кровотока кожи человека в условиях концентрации сенсорного и моторного внимания.* В условиях эксперимента ни в одной серии не выявлено значимого изменения ЧСС, что дает основание предполагать о незначительном стрессогенном эффекте разработанных экспериментальных процедур и отсутствие значимых сдвигов в

центральной гемодинамике (табл. 1). Для оценки возможных изменений на уровне активности отделов вегетативной нервной системы был проведен спектральный анализ ВСР. В диапазоне  $LF$  значимых изменений мощности не выявлено ни в одной серии исследования (табл. 1). В диапазоне  $HF$  достоверные изменения относительной мощности колебаний наблюдались только в серии “Метка” при стимуляции с частотой 0.04 Гц (+22%) (табл. 1). Произвольная активность вызывала снижение показателя  $LF/HF$ : при стимуляции с частотой 0.04 Гц в пределах 24–49%, при частоте стимуляции 0.1 Гц в пределах 6–44% по сравнению с исходным уровнем (табл. 1). Данная тенденция проявлялась во всех сериях, за исключением серии “Подсчет в уме”, где, напротив, значение  $LF/HF$  возрастало в пределах 26–38% (табл. 1). Таким образом, произвольное сенсорное внимание в сочетании с моторной активностью может сопровождаться относительным увеличением парасимпатической активности при снижении активности гуморально-метаболических механизмов регуляции. При этом следует отметить, что диапазон изменений показателя  $LF/HF$  (0.76–1.68) находится в пределах значений, соответствующих нормальному симпатовагальному балансу (0.5–2.5) [26], что говорит об отсутствии существенных сдвигов вегетативного баланса в условиях принятых протоколов исследований.

Достоверные изменения базального уровня кровотока кожи в данных условиях показаны только в сериях “Подсчет в уме” и “Глаза”, которые не сопровождалась моторной активностью рук (табл. 1). В серии “Подсчет в уме” ментальная активность вызывала увеличение ПМ на 14 и 19% при стимуляции с частотой 0.04 и 0.1 Гц соответственно (табл. 1). В серии “Глаза” достоверное увеличение базального уровня кровотока наблюдалось только при частоте стимуляции 0.1 Гц (+10% по сравнению с исходным уровнем) (табл. 1).

Для оценки влияния центральной команды на ритмическую структуру колебаний сердечного ритма был проведен спектральный анализ сигналов. На рис. 1 и 2 представлены усредненные амплитудно-частотные спектры кардиоинтервалграмм, а также ЛДФ-грамм кожи предплечья и пальца для всех серий исследования.

Выявлено, что сердечный ритм демонстрирует высокую чувствительность в условиях произвольной активности. Достоверные относительные изменения амплитуды колебаний на частотах стимуляции выявлены в сериях “Глаза”, “Метка” и “Максимум” (табл. 2). Во всех указанных сериях концентрация внимания и моторная активность вызывают увеличение спектральной амплитуды колебаний сигнала на частоте, соответствующей частоте стимуляции (табл. 2). В условиях стиму-

**Таблица 1.** Показатели сердечного ритма и кровотока кожи предплечья и пальца при различной степени концентрации сенсорного и моторного внимания ( $M \pm m$ )

Параметры	Условия исследования	Серия				
		подсчет в уме ( $n = 10$ )	глаза ( $n = 20$ )	метка ( $n = 10$ )	максимум ( $n = 10$ )	рисование ( $n = 9$ )
ЧСС, уд./мин	Исходно	78.6 ± 2.5	80.4 ± 2.8	76.3 ± 2.5	76.3 ± 2.5	76.3 ± 2.3
	АМ 0.04 Гц	78.7 ± 2.5	79.9 ± 2.5	74.9 ± 2.5	76.4 ± 2.3	75.4 ± 2.7
	АМ 0.1 Гц	78.5 ± 2.3	79.3 ± 2.3	75.5 ± 2.4	75.8 ± 2.3	75.8 ± 2.8
LF, %	Исходно	27.9 ± 2.7	31.1 ± 3.6	36.8 ± 3.5	36.8 ± 3.5	37.1 ± 4.9
	АМ 0.04 Гц	31.5 ± 2.4	33.8 ± 1.6	35.8 ± 2.3	36.4 ± 1.6	33.1 ± 3.4
	АМ 0.1 Гц	31.4 ± 2.1	33.6 ± 2.7	37.4 ± 2.2	42.0 ± 3.2	34.1 ± 3.8
HF, %	Исходно	40.4 ± 3.7	38.7 ± 4.9	35.7 ± 4.5	35.7 ± 4.5	32.3 ± 6.5
	АМ 0.04 Гц	39.7 ± 5.1	44.6 ± 2.1	43.2 ± 3.8*	40.5 ± 2.5	38.4 ± 5.5
	АМ 0.1 Гц	35.9 ± 4.2	45.4 ± 2.8	39.2 ± 4.3	40.1 ± 2.7	36.7 ± 6.5
LF/HF	Исходно	0.8 ± 0.1	1.6 ± 0.4	1.3 ± 0.2	1.3 ± 0.2	1.7 ± 0.5
	АМ 0.04 Гц	1.0 ± 0.2	0.8 ± 0.1	1.0 ± 0.2*	0.9 ± 0.1	1.0 ± 0.2
	АМ 0.1 Гц	1.0 ± 0.2	0.9 ± 0.2	1.2 ± 0.3	1.1 ± 0.2	1.2 ± 0.3
ПМ <sub>предпл.</sub> , пф. ед.	Исходно	2.6 ± 0.3	4.7 ± 0.7	3.4 ± 0.4	3.4 ± 0.4	4.0 ± 0.5
	АМ 0.04 Гц	3.0 ± 0.4*	4.9 ± 0.8	3.5 ± 0.4	3.7 ± 0.5	4.1 ± 0.5
	АМ 0.1 Гц	3.1 ± 0.5*	5.1 ± 0.9*	3.6 ± 0.5	3.5 ± 0.5	4.3 ± 0.5
ПМ <sub>палец.</sub> , пф. ед.	Исходно	17.6 ± 2.2	20.7 ± 1.3	15.9 ± 3.1	15.9 ± 3.1	19.2 ± 3.0
	АМ 0.04 Гц	17.6 ± 2.2	20.9 ± 1.3	14.9 ± 2.9	14.5 ± 3.4	22.1 ± 2.8
	АМ 0.1 Гц	19.5 ± 2.1	21.3 ± 1.3	14.6 ± 3.1	13.9 ± 3.3	22.6 ± 2.9

Примечание: \* – различия достоверны по сравнению с исходным состоянием ( $p < 0.05$ ).

**Таблица 2.** Нормированные значения амплитуд колебаний сердечного ритма, кровотока кожи предплечья и пальца на частоте модуляции шума при различной степени концентрации сенсорного и моторного внимания ( $M \pm m$ )

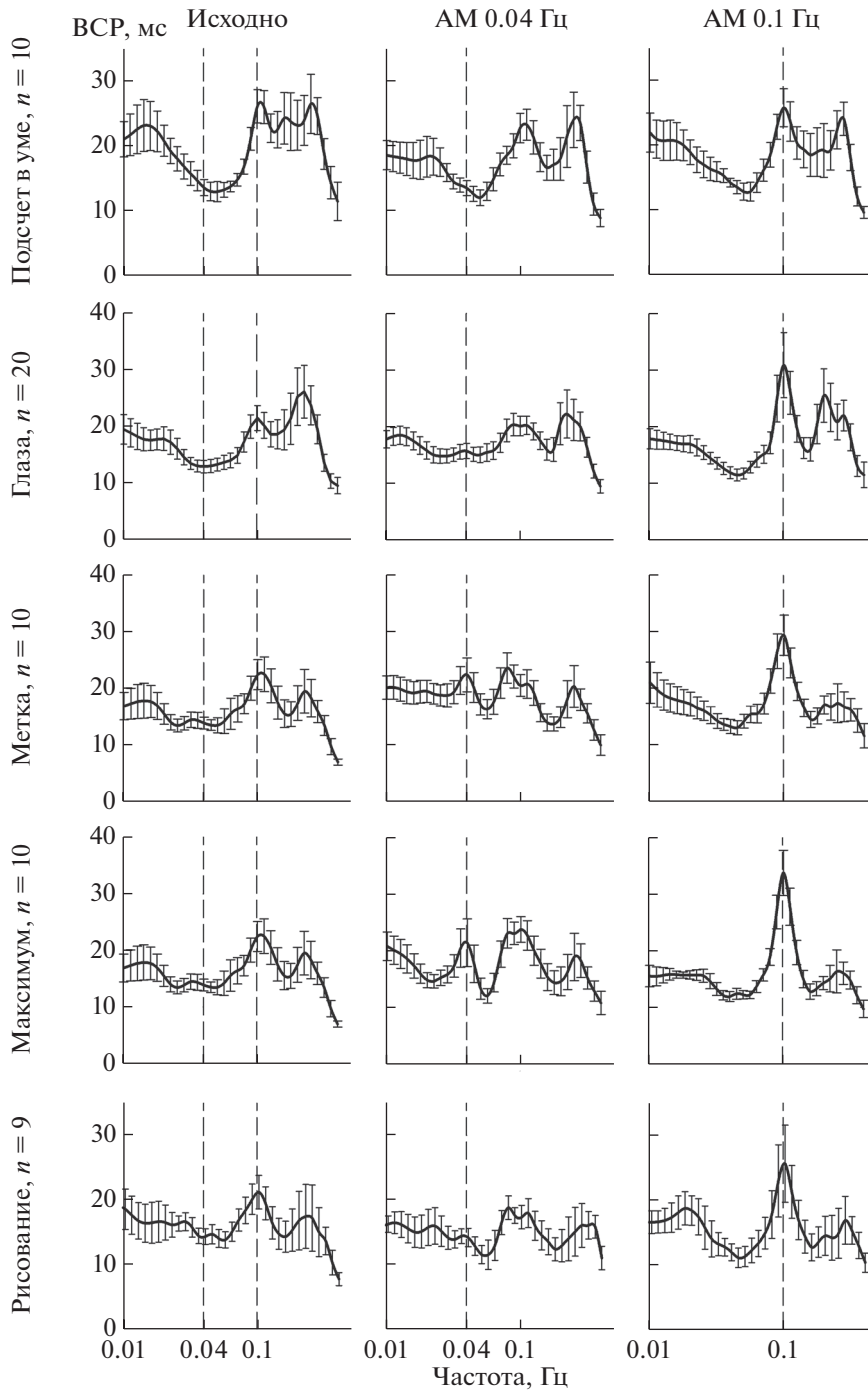
Серия	ВСР		Предплечье		Палец	
	0.04 Гц	0.1 Гц	0.04 Гц	0.1 Гц	0.04 Гц	0.1 Гц
Подсчет в уме, $n = 10$	1.1 ± 0.1	1.1 ± 0.2	1.1 ± 0.1	1.3 ± 0.1	1.3 ± 0.2	1.5 ± 0.2*
Глаза, $n = 20$	1.3 ± 0.1*	1.5 ± 0.2*	1.1 ± 0.2	1.3 ± 0.1	1.8 ± 0.3*	1.4 ± 0.2*
Метка, $n = 10$	1.7 ± 0.2*	1.4 ± 0.1*	1.7 ± 0.3*	1.2 ± 0.4	1.7 ± 0.3*	1.3 ± 0.3
Максимум, $n = 10$	1.6 ± 0.3*	1.8 ± 0.3*	2.1 ± 0.2*	1.3 ± 0.2	2.2 ± 0.3*	1.5 ± 0.2*
Рисование, $n = 9$	1.0 ± 0.1	1.3 ± 0.4	1.1 ± 0.2	1.2 ± 0.1	1.2 ± 0.3	1.2 ± 0.3

Примечание: \* – различия достоверны по сравнению с исходным состоянием ( $p < 0.05$ ).

ляции с частотой 0.04 Гц в соответствующих спектрах (рис. 1, 2) формируется выраженный пик на частоте стимуляции. При стимуляции с частотой 0.1 Гц реакция проявляется в увеличении амплитуды исходно имеющегося пика на той же частоте (рис. 1, 2). В серии “Глаза” продемонстрировано увеличение амплитуды колебаний сердечного ритма на частоте 0.04 Гц в 1.3 раза, при стимуляции с частотой 0.1 Гц – в 1.5 раза (табл. 2). Серия “Метка” вызывала увеличение амплитуды колебаний сердечного ритма на ча-

стоте 0.04 Гц в 1.7 раза, при стимуляции с частотой 0.1 Гц – в 1.4 раза. В серии “Максимум” амплитуда колебаний сердечного ритма при частоте стимуляции 0.04 Гц увеличилась в 1.6 раза, при частоте стимуляции 0.1 Гц – в 1.8 раза. В серии “Подсчет в уме” и “Рисование” достоверных изменений в спектрах ВСР не выявлено (табл. 2).

Поскольку исследования проводили в разное время в группах с разным количеством испытуемых, усредненные спектры ЛДФ-грамм в исходных условиях в разных сериях имеют незначи-

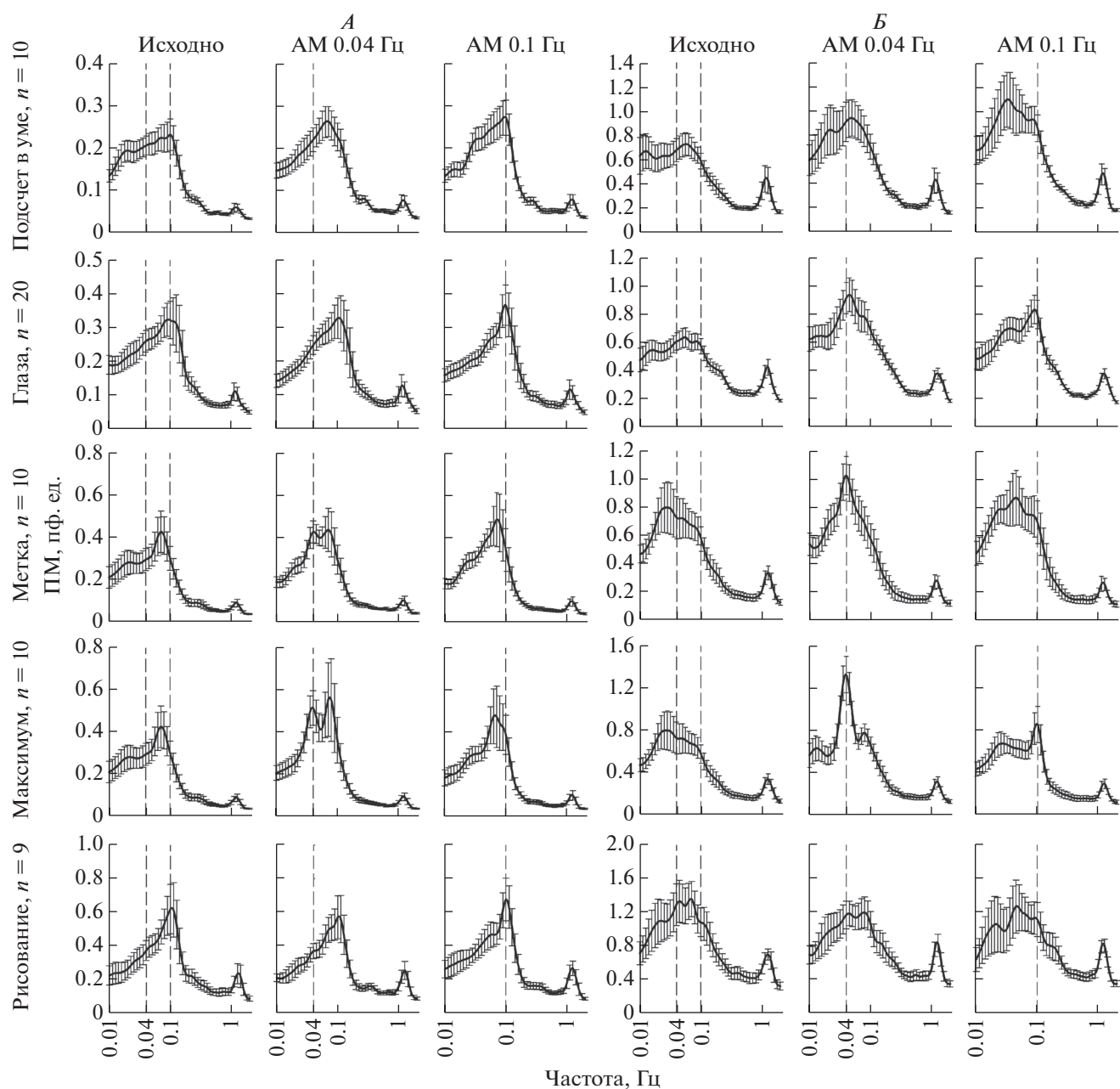


**Рис. 1.** Усредненные амплитудно-частотные спектры ВСР в исходном состоянии и в условиях стимуляции амплитудно-модулированным шумом с разной частотой (АМ) при различной степени концентрации сенсорного и моторного внимания ( $M \pm m$ ). Вертикальными пунктирными линиями отмечены частоты, соответствующие частотам модуляции шума.

тельные отличия, не выходящие за пределы внутригрупповой вариабельности.

Ритмическая структура, как микроциркуляторного кровотока кожи, так и ВСР, демонстрирует высокую чувствительность к влиянию центральной команды в условиях концентрации вни-

мания и различного рода моторной активности. Реакция проявляется в увеличении амплитуды колебаний в спектре сигнала на частоте, соответствующей частоте стимуляции, что сопровождается появлением выраженных пиков на соответствующих частотах (рис. 2).



**Рис. 2.** Усредненные амплитудно-частотные спектры ЛДФ-грамм кровотока кожи предплечья (А) и пальца (Б) в исходном состоянии и в условиях стимуляции амплитудно-модулированным шумом с разной частотой (АМ) при различной степени концентрации сенсорного и моторного внимания ( $M \pm m$ ). Остальные обозначения см. рис. 1.

В серии “Подсчет в уме” достоверные изменения спектральных характеристик ЛДФ-грамм наблюдались только при частоте стимуляции 0.1 Гц. Достоверное увеличение амплитуды колебаний кровотока на частоте стимуляции, по сравнению с исходным состоянием, показано только для кровотока кожи пальца (увеличение в 1.5 раза). В серии “Глаза” достоверное увеличение амплитуд колебаний кровотока продемонстрировано, как и в предыдущей серии, только для кровотока

пальца. При этом эффект отмечен при стимуляции с обоими частотами: для 0.04 Гц увеличение составило 1.8 раза, а для 0.1 Гц – 1.4 раза. В серии “Метка” достоверные изменения амплитуды колебаний кровотока выявлены только при частоте стимуляции 0.04 Гц. В этом случае на спектрах наблюдаются отчетливые пики на частоте 0.04 Гц: относительное увеличение амплитуды составило приблизительно 1.7 раза кровотока обоих исследуемых участков кожи. В серии “Максимум” из-

менения показаны для обеих частот стимуляции. Наибольший эффект в этом случае продемонстрирован при частоте стимуляции 0.04 Гц. В этом случае на спектрах ЛДФ-грамм наблюдаются отчетливые пики на соответствующей частоте: амплитуда колебаний кровотока увеличилась приблизительно в 2.1 раза для кровотока кожи предплечья и в 2.2 раза для кровотока кожи пальца. При стимуляции с частотой 0.1 Гц достоверное увеличение колебаний кровотока на частоте стимуляции показано только для кровотока кожи пальца (в 1.5 раза). В серии “Рисование” значимых изменений спектральных характеристик колебаний кровотока кожи предплечья и пальца не выявлено.

Так же как и в случае ВСР, дисперсионный анализ нормированной амплитуды колебаний кровотока кожи для серий с подтвержденным влиянием центральной команды, не выявил достоверных различий в зависимости от частоты стимуляции и степени концентрации сенсорного и моторного внимания.

Как уже говорилось, протокол данной части исследования обеспечивал различный уровень концентрации произвольного сенсорного и моторного внимания со стороны испытуемых в процессе выполнения задач исследования. На рис. 1, 2, и в табл. 2 данные серий расположены в порядке увеличения сложности задания. Таким образом, результаты могут иллюстрировать реактивность ВСР и микроциркуляторного кровотока в зависимости от степени сосредоточенности испытуемых.

Возможно, что ответная реакция формируется только при определенной степени концентрации внимания в сочетании с периодической произвольной активностью. В этой связи отсутствие реакции со стороны ВСР и колебаний кровотока в серии “Подсчет в уме” может быть объяснено тем, что мысленный подсчет периодов модуляции шума, по-видимому, не требует высокой концентрации внимания и не обеспечивает строгой периодичности реакции. Достоверно значимые изменения показателей ВСР и микроциркуляторного кровотока были получены в сериях “Глаза”, “Метка” и “Максимум”, где требовалось сочетание высокого уровня периодической концентрации внимания и четкой периодичной мышечной активности. Отсутствие реакции со стороны ВСР и кровотока кожи пальца и предплечья в серии “Рисование” на первый взгляд, кажется противоречивым, так как в этом случае, вероятно, требуется наибольший уровень концентрации сенсорного и моторного внимания. Однако необходимо учитывать, что концентрация внимания и моторная реакция в этом случае продолжалась непрерывно на протяжении всего времени исследования, в отличие от периодической реакции в

сериях “Метка” и “Максимум”. Это и является основным фактором обеспечивающим отсутствие периодических ответных реакций со стороны ВСР, кровотока кожи пальца и предплечья в ответ на концентрацию внимания при отсутствии периодической составляющей.

Таким образом, полученные результаты позволяют говорить о том, что периодизация реакции является ключевым фактором влияния на ритмическую структуру ВСР и колебаний микроциркуляторного кровотока. При этом характер реакции микроциркуляторного кровотока зависит как от частоты воздействия, так и от регионарных особенностей области регистрации кожной микрогемодинамики. Согласно современным представлениям центральные влияния на сердечно-сосудистую систему и, в частности, на микроциркуляторный кровоток, опосредуются вегетативной нервной системой. В случае кровотока кожи конечностей главным посредником является симпатический отдел вегетативной нервной системы. В соответствии с этим можно полагать, что области конечности с более выраженной симпатической иннервацией (в нашем случае кожа пальца) будут демонстрировать более выраженную реакцию при увеличении уровня внимания. В данных условиях это подтверждается тем, что кровоток кожи пальца действительно оказывается более чувствительным к воздействию центральной команды: достоверные изменения амплитуды колебаний кровотока наблюдаются в четырех сериях из пяти, в то время как для кровотока кожи предплечья только в двух из пяти. Большая чувствительность микроциркуляторного кровотока кожи пальца также подтверждается достоверной реакцией на стимуляцию с частотой 0.04 и 0.1 Гц, тогда как кровоток кожи предплечья реагирует только в условиях стимуляции с частотой 0.04 Гц.

*Динамика колебаний сердечного ритма и микроциркуляторного кровотока кожи человека в зависимости от частоты концентрации сенсорного и моторного внимания.* В связи с тем, что результаты первой части исследования продемонстрировали различный характер реакции ВСР и колебаний объемной скорости микроциркуляторного кровотока на частотах стимуляции 0.04 и 0.1 Гц, важно выяснить характер частотной зависимости реакции. Для выявления частотной зависимости реакции была проведена серия по протоколу “Максимум” с расширенным набором частот стимуляции. Данный протокол, с высоким уровнем сенсорного и моторного внимания, продемонстрировал наиболее выраженную реакцию на периодическую произвольную активность со стороны микроциркуляторного кровотока. Считая главным механизмом реализации центральных влияний симпатическую регуляцию и принимая во внимание известные ограничения реакцион-



**Таблица 3.** Параметры сердечного ритма и кровотока кожи пальца в исходных условиях и при акустической стимуляции ( $M \pm m$ ,  $n = 26$ )

Параметры	Исходно	Немодулированный шум	Амплитудно-модулированный шум (частота модуляции, Гц)				
			0.02	0.04	0.06	0.08	0.1
ЧСС, уд./мин	79.9 ± 1.9	79.3 ± 1.8	80.3 ± 2.0	80.2 ± 1.9	80.0 ± 2.0	79.6 ± 2.1	80.4 ± 1.8
LF, %	33.8 ± 3.4	35.5 ± 2.8	42.7 ± 2.3	38.3 ± 2.7	46.2 ± 3.0	42.4 ± 2.6	40.6 ± 3.2
HF, %	44.9 ± 4.4	36.4 ± 3.9	29.8 ± 3.2	33.0 ± 3.1	35.7 ± 3.7	40.0 ± 3.2	33.9 ± 3.5
LF/HF	1.3 ± 0.3	1.7 ± 0.4	2.0 ± 0.3	1.7 ± 0.3	2.5 ± 0.6	1.4 ± 0.2	1.8 ± 0.3
ПМ, пф. ед.	18.7 ± 1.1	19.9 ± 1.4	23.1 ± 1.4	18.1 ± 1.3	22.4 ± 1.5	21.8 ± 1.5	18.8 ± 1.2

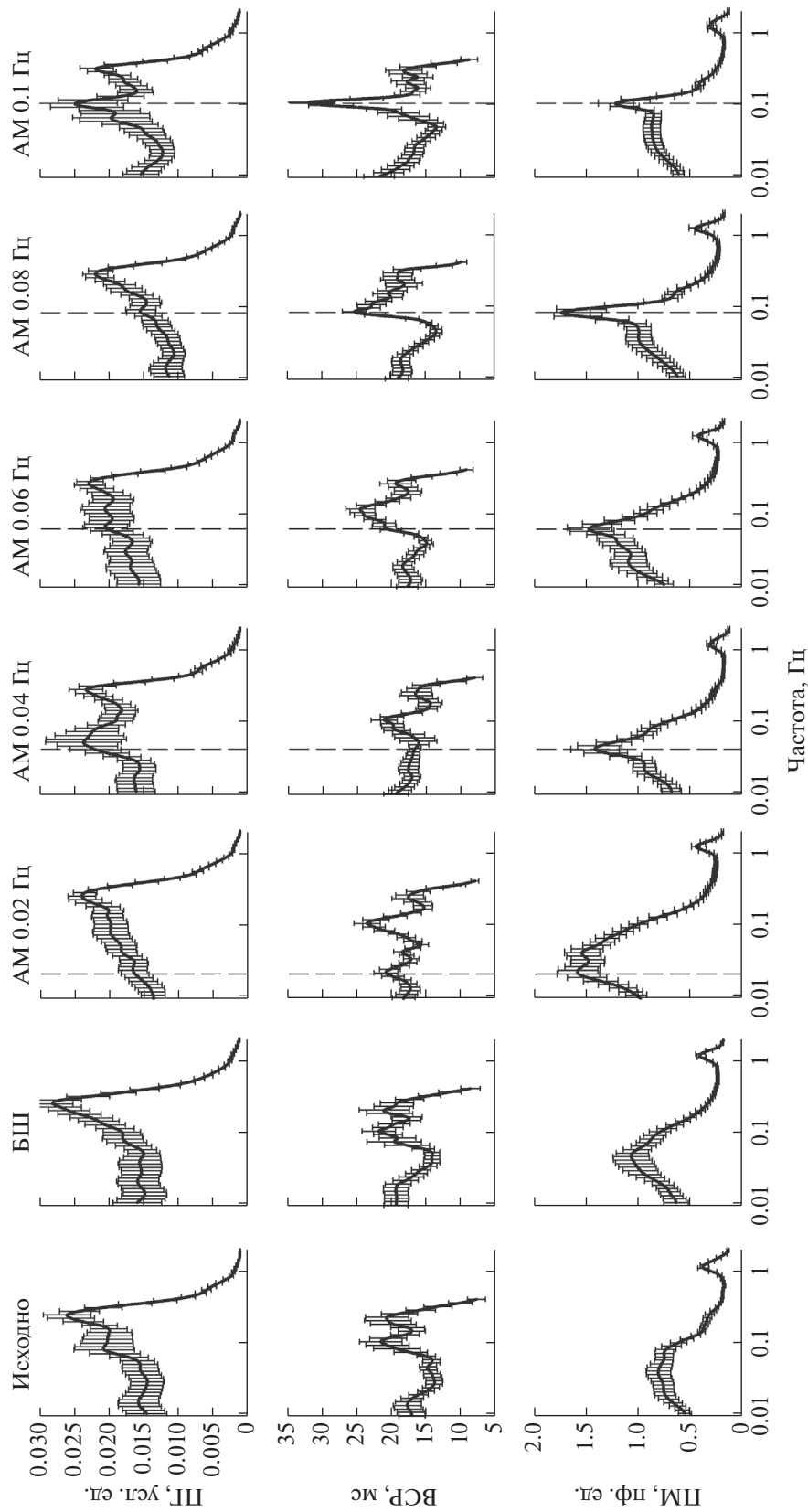
ной способности симпатических механизмов регуляции для частот выше 0.1 Гц [30, 31], мы ограничили верхний предел частоты стимуляции частотой 0.1 Гц и расширили набор частот в низкочастотную область (0.02, 0.04, 0.06, 0.08 Гц).

Для оценки возможной значимости акустической стимуляции как стресс-фактора были проанализированы результаты воздействия низкоинтенсивной акустической стимуляции с немодулированным и модулированным шумом на параметры сердечного ритма и показатели микроциркуляции кровотока кожи пальца (табл. 3). Используемый уровень громкости шума не оказывал достоверного влияния на ЧСС, относительную спектральную мощность в диапазонах LF и HF и величину отношения LF/HF (табл. 3). Не было выявлено и достоверного изменения уровня базального кровотока кожи пальца (ПМ) в условиях акустической стимуляции (табл. 3). Отсутствие значимых изменений указанных параметров сердечно-сосудистой системы, которые трактуются как неспецифические проявления комплекса вегетативных стресс-реакций на звуковую стимуляцию, свидетельствует о том, что акустическая стимуляция в заданных условиях не является значимым стресс-фактором.

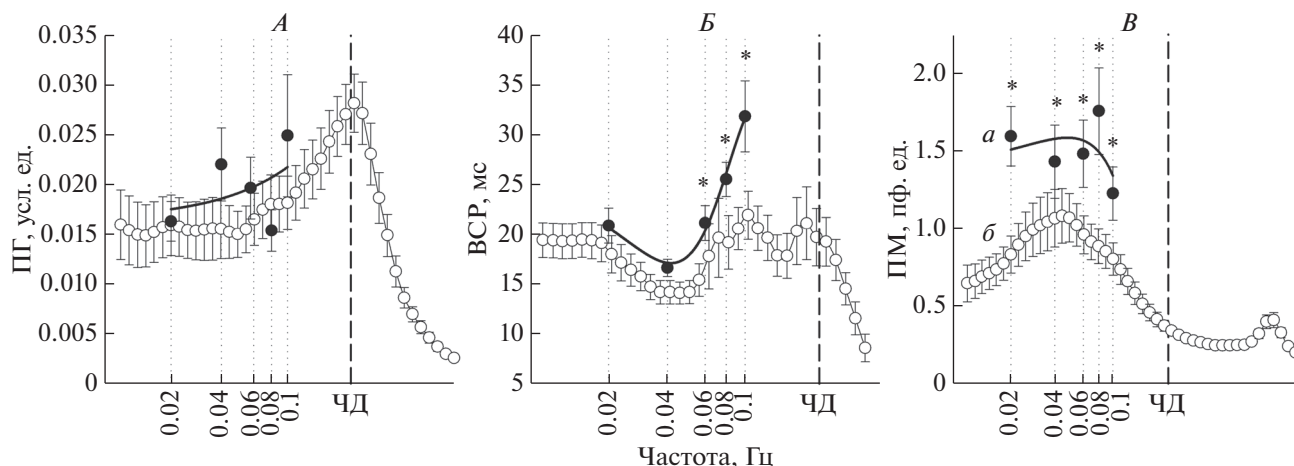
Для оценки влияния периодической произвольной активности на ритмическую структуру колебаний сердечного ритма, дыхания и периферического кровотока кожи пальца проведен спектральный анализ соответствующих сигналов (рис. 3). Спонтанное дыхание во всех сериях исследования характеризуется широким поличастотным спектром, что обусловлено индивидуальной вариабельностью частоты дыхания испытуемых и наличием естественных эпизодов нарушения ритма дыхания (спонтанные вдохи и паузы). Периодическая произвольная активность не вызывает достоверных изменений средней частоты и амплитуды дыхания ни в одном из используемых режимов. Однако необходимо отметить, что при воздействии модулируемого шума с частотой 0.04 и, в особенности, с частотой 0.1 Гц, в соответствующих спектрах появляются пики на частотах, соответствующих частоте модуляции.

Высокая индивидуальная вариабельность амплитуд на указанных частотах не позволила выявить достоверных изменений, однако это может свидетельствовать о том, что у испытуемых эпизодически происходила синхронизация частоты дыхания в соответствии с модуляцией шума. Такая синхронизация частоты дыхания как непроизвольная реакция, очевидно, может быть обусловлена концентрацией внимания при отслеживании ритма модуляции.

Усредненные амплитуды колебаний пневмограммы на частоте акустической стимуляции, в сравнении со спектром колебаний в условиях воздействия немодулированного шума, представлены на рис. 4, А. При воздействии немодулированного шума дыхание представлено широким частотным спектром с выраженным максимумом на частоте 0.24 Гц, соответствующем усредненной частоте дыхания. На спектре ВСР (рис. 4, Б) наблюдается максимум соответствующий усредненной частоте дыхания, что отражает известную связь колебаний сердечного ритма в диапазоне HF и дыхания [26]. На усредненном спектре колебаний микроциркуляторного кровотока кожи пальца (рис. 4, В), напротив, выраженный пик на частоте дыхания отсутствует. Как известно, в условиях спонтанного дыхания респираторно-зависимые колебания в микроциркуляторном кровотоке кожи в норме выражены слабо. Согласно современным представлениям респираторные колебания в микроциркуляторном кровотоке имеют центральную природу (респираторная модуляция венозного кровотока) и распространяются пассивно [23, 32]. В этой связи респираторно-зависимые колебания характерны для венозного звена микроциркуляторного русла и их выраженность определяется градиентом артерио-венозного давления. Для кровотока кожи верхних конечностей в норме характерен относительно высокий градиент перфузионного давления, и поэтому респираторно-зависимые колебания в нативном состоянии слабо выражены [23, 32]. Периодическая концентрация внимания значимым образом не оказывает влияния на амплитуду дыхания ни на одной из частот стимуляции. Ды-



**Рис. 3.** Усредненные амплитудно-частотные характеристики пневмограмм, ВСР и ЛДФ-грамм кожи пальца в исходных условиях, при воздействии немодулированного (БШ) и амплитудно-модулированного (AM) шума с разной частотой ( $M \pm m$ ,  $n = 26$ ). Остальные обозначения см. рис. 1.



**Рис. 4.** Усредненные амплитуды колебаний пневмограмм (А), сердечного ритма (Б) и кровотока кожи пальца (В) на частоте акустической стимуляции в условиях ментальной активности (а), ( $M \pm m$ ,  $n = 26$ ). Для сравнения представлены усредненные спектры колебаний в условиях воздействия немодулированного шума (б). Вертикальной пунктирной линией обозначена усредненная частота дыхания (ЧД) в условиях воздействия немодулированного шума. \* – различия достоверны по сравнению с воздействием немодулированного шума ( $p < 0.05$ ).

хательная модуляция в данном случае не является значимым механизмом генерации колебаний на уровне сердечного ритма и микроциркуляторного кровотока кожи.

Воздействие немодулированного шума не оказывает заметного влияния на ритмическую структуру сердечного ритма испытуемых (рис. 3). Напротив, влияние модулированного шума вызывает появление в спектре сердечного ритма пиков на частотах, соответствующих частотам модуляции шума. Усредненные амплитуды колебаний сердечного ритма на частоте акустической стимуляции, в сравнении со спектром колебаний в условиях воздействия немодулированного шума, представлены на рис. 4, Б. Стимуляция с частотами модуляции 0.02 и 0.04 Гц не вызывает достоверного изменения амплитуды колебаний сердечного ритма на соответствующих частотах (рис. 4, Б). Однако при модуляции шума частотами 0.06, 0.08 и 0.1 Гц наблюдается достоверное увеличение амплитуды колебаний сердечного ритма на соответствующей частоте по сравнению с исходным состоянием (рис. 4, Б). При этом прирост амплитуды колебаний в данном диапазоне не линеен и пропорционален частоте модуляции шума (увеличение в 1.2, 1.4 и 1.5 раза для частот 0.06, 0.08 и 0.1 Гц соответственно).

Так же как и для ВСР немодулированный шум не вызывает достоверных изменений ритмической структуры колебаний кровотока кожи пальца (рис. 3). Однако в условиях воздействия модулированного шума наблюдаются существенные изменения спектральных характеристик, проявляющиеся в достоверном увеличении амплитуд колебаний на частотах, соответствующих частотам модуляции. Усредненные амплитуды колеба-

ний кровотока на частоте акустической стимуляции в сравнении со спектром колебаний в условиях воздействия немодулированного шума представлены на рис. 4, В. Наблюдаемое увеличение амплитуды колебаний микроциркуляторного кровотока кожи достоверно для всех используемых частот модуляции шума. При частоте модуляции 0.02 Гц соответствующая спектральная амплитуда увеличивается приблизительно в 1.9 раза. Также отмечено достоверное увеличение спектральной амплитуды приблизительно в 1.8 раза на кратной частоте 0.04 Гц, которая в данном случае, по-видимому, является первой гармоникой основного колебания. При частоте модуляции шума 0.04 Гц соответствующая спектральная амплитуда увеличивается приблизительно в 1.3 раза. При частоте модуляции шума 0.06 Гц соответствующая спектральная амплитуда увеличивается приблизительно в 1.6 раза. Также наблюдается увеличение амплитуды на частоте 0.02 Гц в 1.3 раза. При частоте модуляции шума 0.08 Гц наблюдается максимальный двукратный прирост амплитуды колебаний кровотока. При частоте модуляции шума 0.1 Гц соответствующая спектральная амплитуда увеличивается приблизительно в 1.6 раза.

Представленные частотные зависимости амплитуд колебаний сердечного ритма и микроциркуляторного кровотока кожи пальца в условиях ментальной активности (рис. 4, Б, В) хорошо соответствуют частотным зависимостям амплитуды респираторно зависимых колебаний в условиях контролируемого глубокого дыхания, полученных нами ранее [22, 23]. Для ЧСС зависимость амплитуды ВСР от частоты дыхания не линейна и хорошо аппроксимировалась колоколообразной кривой. Максимальная амплитуда респираторно-

зависимых колебаний сердечного ритма наблюдалась при частоте воздействия в диапазоне 0.05–0.1 Гц [22]. Для кровотока кожи пальца частотная зависимость также имела нелинейный характер, но не колоколообразный, а близкий к *S*-образному [23]. При этом наблюдалось сходство характера зависимостей для ВСР и кровотока кожи в диапазоне частот воздействия 0.1–0.25 Гц, где кривые демонстрировали резкое увеличение амплитуды колебаний с уменьшением частоты воздействия. В диапазоне частот от 0.1 до 0.03 Гц, в отличие от ВСР, напротив, не наблюдалось значимого снижения амплитуды вынужденных колебаний в спектрах колебаний кровотока кожи. Существенной особенностью динамики амплитуды отклика системы микроциркуляции являлось то, что амплитуда индуцированных глубоким дыханием колебаний кровотока в сравнении с амплитудой колебаний на соответствующей частоте, зарегистрированной в условиях спонтанного дыхания, увеличивалась пропорционально ей и эта пропорция не зависела от частоты воздействия.

Влияние ментальной активности в форме периодической произвольной концентрации внимания и моторной активности также демонстрирует различный характер зависимости амплитуды собственных колебаний от частоты стимуляции для ВСР и микроциркуляторного кровотока кожи. Для колебаний сердечного ритма характерен частотно-избирательный отклик системы на воздействие с максимумом на частоте 0.1 Гц. Колебательная система микроциркуляторного кровотока демонстрирует аддитивный характер взаимодействия, что проявляется в пропорциональном увеличении амплитуды колебаний по отношению к исходному уровню на соответствующей частоте. Необходимо отметить, что контролируемое дыхание сопровождается существенно большей амплитудой вызванных колебаний по сравнению с ментальной нагрузкой, что особенно заметно в случае ВСР.

Характер частотно-зависимого отклика на контролируемое глубокое дыхание и периодическую ментальную активность существенно различается для ВСР и микроциркуляторного кровотока, что, очевидно, обусловлено различием имманентных механизмов генерации колебаний. Однако на уровне отдельного структурного звена характер частотной зависимости имеет принципиальное сходство для обоих используемых факторов воздействия, что подразумевает общность механизмов реакции.

Для ВСР в условиях контролируемого по частоте дыхания наши результаты согласуются с гипотезой о резонансном характере частотно-зависимого отклика [22, 33, 34]. Резонансно-подобный характер частотно-зависимого отклика в условиях периодической ментальной активности

выявленный нами, позволяет говорить наличие взаимодействия автономных механизмов контроля ЧСС и активности коры больших полушарий. Известно, что произвольное внимание сопровождается изменениями состояния висцеральных систем (изменение ЧСС, артериального давления, частоты дыхания), что способствует повышению чувствительности сенсорных систем и, в конечном итоге, способствует эффективной селекции информации [1–5, 16, 35, 36]. Необходимо отметить, что возможные колебания артериального давления, возникающие в условиях периодической концентрации внимания и произвольной моторной активности, самостоятельно могут служить общим механизмом генерации колебаний как на уровне сердечного ритма (посредством барорефлекторного механизма), так и на уровне микроциркуляторного кровотока (посредством прямой передачи давления).

Возникновение резонансного усиления колебаний на уровне кровотока нежелательно, так как высокоамплитудные колебания давления (скорости) кровотока могут сильно изменить характер течения крови и вызвать повреждение сосудов. На уровне микроциркуляторного кровотока развитие резонансных эффектов ограничивается нелинейностью вязкоупругих свойств стенки сосудов и диссипативными потерями, обусловленными высокой вязкостью и неньютоновскими свойствами крови.

Показанный нами аддитивный характер взаимодействия индуцированных колебаний и собственных колебаний кровотока кожи приводит к вопросу о существовании в системе микроциркуляции колебаний скорости кровотока локального генеза. Этот вопрос требует дальнейшей экспериментальной проверки, однако он не противоречит существованию колебаний скорости кровотока центрального генезиса. Не следует исключать существование механизма, который на уровне микрососудов консолидирует колебания скорости кровотока различного генезиса. Показанная нами ранее высокая степень пространственной синхронизации колебаний нейрогенного и миогенного диапазонов [37] демонстрирует ведущую роль центральных механизмов в их синхронизации. Поэтому вынужденные колебания соответствующей частоты, формирующиеся в условиях контролируемого дыхания и ментальной активности, можно рассматривать как модуляции колебаний центральной природы, транслируемых на уровень микроциркуляторного кровотока. Известно, что глубокое контролируемое дыхание может модулировать кожную симпатическую активность на уровне взаимодействия автономных центров в стволе мозга [24, 32, 33]. Нами показано, что в условиях произвольной ментальной активности также возможна модуляция кожной симпатической активности. При этом

эффекты влияния глубокого произвольного дыхания и периодической произвольной активности оказываются сопоставимы. Различие в величине эффекта обусловлено тем, что контроль дыхания в описываемом исследовании требовал большей ментальной активности. Испытуемые управляли глубиной, формой и частотой экскурсий грудной клетки на основе биологической обратной связи, визуально совмещая собственную кривую дыхания (показания с грудного пневмографического датчика) с эталонной кривой, демонстрируемой на мониторе персонального компьютера. Также при глубоком дыхании задействован существенно больший объем мышц, по сравнению с объемом, необходимым для осуществления движения указательного пальца. Таким образом респираторно-зависимые эффекты на уровне микроциркуляторного кровотока в условиях произвольного контроля, по меньшей мере, частично, могут быть обусловлены именно центральными влияниями коры больших полушарий.

Полученные нами результаты демонстрируют, что ментальная активность в форме произвольной периодической концентрации сенсомоторного внимания и мышечной активности может служить самостоятельным фактором модуляции колебаний кровотока. Влияния коры больших полушарий в форме центральной команды могут проявляться в широком диапазоне частот и играть заметную роль в ответах системы микроциркуляции кожи в экспериментах с наличием произвольного компонента реакции испытуемых. Традиционно исследования механизмов центральной команды проводятся на основе интенсивной и продолжительной статической или динамической нагрузки. В данном случае физическая нагрузка была незначительной и непродолжительной (нажатие кнопки компьютерной мыши указательным пальцем). Кроме того, регистрация параметров микроциркуляторного кровотока кожи осуществлялась на контралатеральной конечности, что исключало действие механических факторов и возможных механо- и метаболических факторов от рецепторов работающих мышц. Эти факты свидетельствуют о том, что основным механизмом реализации центральных влияний на уровне периферического кровотока является центральная модуляция симпатической сосудистой регуляции. При этом микроциркуляторный кровоток кожи демонстрирует высокую чувствительность к центральным влияниям.

Специфика частотной зависимости эффектов ментальной активности также может быть объяснена особенностями симпатической регуляции. Как известно, «инерционность» симпатических синапсов препятствуют генерации колебаний симпатической активности с частотой выше 0.15 Гц [30, 31]. Парасимпатический отдел вегета-

тивной нервной системы, напротив, реагирует достаточно быстро, чтобы опосредовать флуктуации в сердечно-сосудистых сигналах с частотой выше 0.1 Гц [26, 30, 32]. Данный факт может объяснить существенное различие характера частотной зависимости для ВСП, где механизмы парасимпатической регуляции играют значимую роль. Однако, в отличие от механизмов симпатического контроля, широко представленных в регуляции сердечного ритма и микроциркуляторного кровотока, парасимпатическая активность считается незначительной в периферической вазорегуляции и практически не влияет на периферическое сопротивление. Показано, что передаточная функция от кожной симпатической вазоконстрикторной активности до вазоконстрикторных эффектов кожного кровотока имеет характеристики фильтра нижних частот с частотой среза порядка 0.3 Гц [30, 31]. Это приводит к тому, что амплитуда симпатической-обусловленных эффектов резко падает в диапазоне частот 0.1–0.3 Гц. Таким образом, продемонстрированная частотная зависимость амплитуды вынужденных колебаний может быть объяснена указанными выше частотными ограничениями модуляции нейронных колебаний микроциркуляторного кровотока.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования показано, что ментальная активность в виде периодической концентрации сенсорного и моторного внимания в сочетании с произвольной периодической мышечной активностью оказывает достоверное влияние на ритмическую структуру сердечного ритма и колебаний микроциркуляторного кровотока кожи. Наибольшую чувствительность к воздействию в данных условиях демонстрирует ритмическая структура колебаний, что проявляется в частотной подстройке ритма и появлении спектральных пиков, соответствующих частоте модуляции шума. При этом реакция микроциркуляторного кровотока зависит от частоты стимуляции и регионарных особенностей его регуляции, в частности плотности симпатической иннервации. Необходимо подчеркнуть, что ключевым моментом данных исследований является активное участие испытуемых. Наибольшая эффективность стимуляции выявлена в исследованиях с механической фиксацией максимумов громкости акустического амплитудно-модулированного шума в условиях сочетания высокой степени периодической концентрации внимания с периодической моторной реакцией. В этой связи можно полагать, что реализация влияния коры больших полушарий на уровне сердечного ритма и микроциркуляторного кровотока обусловлена активностью механизмов симпатического кон-

троля и реализуется по механизму центральной команды. Подтверждением этого является продемонстрированная нами большая чувствительность к стимуляции кровотока кожи пальца, как зоны характеризующейся более высокой плотностью симпатической иннервации. Представленные результаты вносят вклад в понимание центральных нейрогенных механизмов контроля периферического кровотока, обусловленных произвольной активностью.

**Этические нормы.** Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены локальным биоэтическим комитетом Больницы Пушкинского научного центра РАН (Пушино).

**Информированное согласие.** Каждый участник исследования представил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Verberne A.J., Owens N.C.* Cortical modulation of the cardiovascular system // *Prog. Neurobiol.* 1998. V. 54. № 2. P. 149.
2. *Shoemaker J.K., Goswami R.* Forebrain neurocircuitry associated with human reflex cardiovascular control // *Front. Physiol.* 2015. V. 6. P. 240.
3. *Ginty A.T., Kraynak T.E., Fisher J.P., Gianaros P.J.* Cardiovascular and autonomic reactivity to psychological stress: Neurophysiological substrates and links to cardiovascular disease // *Auton. Neurosci.* 2017. V. 207. P. 2.
4. *Al-Khazraji B.K., Shoemaker J.K.* The human cortical autonomic network and volitional exercise in health and disease // *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* 2018. V. 43. № 11. P. 1122.
5. *Данилова Н.Н., Астафьев С.В.* Внимание человека как специфическая связь ритмов ЭЭГ с волновыми модуляторами сердечного ритма // *Журн. высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова.* 2000. Т. 50. № 5. С. 791.
6. *Critchley H.D.* Neural mechanisms of autonomic, affective, and cognitive integration // *J. Comp. Neurol.* 2005. V. 493. № 1. P. 154.
7. *Fechir M., Schlereth T., Purat T. et al.* Patterns of sympathetic responses induced by different stress tasks // *Open. Neurol. J.* 2008. V. 2. P. 25.
8. *Schechner J.S., Braverman I.M.* Synchronous vasomotion in the human cutaneous microvasculature provides evidence for central modulation // *Microvasc. Res.* 1992. V. 44. № 1. P. 27.
9. *Bernjak A., Cui J., Iwase S. et al.* Human sympathetic outflows to skin and muscle target organs fluctuate concordantly over a wide range of time-varying frequencies // *J. Physiol.* 2012. V. 590. № 2. P. 363.
10. *Lenasi H.* Physical exercise and skin microcirculation // *Period. Biol.* 2014. V. 116. № 1. P. 21.
11. *Williamson J.W.* Autonomic responses to exercise: where is central command? // *Auton. Neurosci.* 2015. V. 188. P. 3.
12. *Brown R., Macefield V.G.* Skin sympathetic nerve activity in humans during exposure to emotionally-charged images: sex differences // *Front. Physiol.* 2014. V. 5. P. 111.
13. *Ootsuka Y., Tanaka M.* Control of cutaneous blood flow by central nervous system // *Temperature (Austin).* 2015. V. 2. № 3. P. 392.
14. *Blessing W., McAllen R., McKinley M.* Control of the cutaneous circulation by the central nervous system // *Compr. Physiol.* 2016. V. 6. № 3. P. 1161.
15. *McAllen R.M., McKinley M.J.* Efferent thermoregulatory pathways regulating cutaneous blood flow and sweating // *Handb. Clin. Neurol.* 2018. V. 156. P. 305.
16. *Мачинская Р.И.* Нейрофизиологические механизмы произвольного внимания (аналитический обзор) // *Журн. высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова.* 2003. Т. 53. № 2. С. 133.
17. *Nobrega A., O'Leary D., Silva B.M. et al.* Neural regulation of cardiovascular response to exercise: role of central command and peripheral afferents // *BioMed. Res. Int.* 2014. V. 2014. Article ID 478965. 20 p.
18. *Micheline L.C., O'Leary D.S., Raven P.B., Nóbrega A.C.* Neural control of circulation and exercise: a translational approach disclosing interactions between central command, arterial baroreflex, and muscle metaboreflex // *Am. J. Physiol. Heart. Circ. Physiol.* 2015. V. 309. № 3. P. 381.
19. *Dampney R.A.* Central neural control of the cardiovascular system: current perspectives // *Adv. Physiol. Educ.* 2016. V. 40. № 3. P. 283.
20. *Greaney J.L., Kenney W.L.* Measuring and quantifying skin sympathetic nervous system activity in humans // *J. Neurophysiol.* 2017. V. 118. № 4. P. 2181.
21. *Takahashi T., Takikawa Y., Kawagoe R.* Differences in the pulsatile component of the skin hemodynamic response to verbal fluency tasks in the forehead and the fingertip // *Sci. Rep.* 2016. V. 6. P. 20978.
22. *Тюрин М.И., Красников Г.В., Танканаг А.В. и др.* Спектры девиации частоты сердечных сокращений человека при контролируемом дыхании // *Регионарное кровообращение и микроциркуляция.* 2011. Т. 10. № 2. С. 64.
23. *Тюрин М.И., Красников Г.В., Танканаг А.В. и др.* Формирование респираторно-зависимых колебаний скорости кровотока в микроциркуляторном русле кожи человека в условиях контролируемого дыхания // *Регионарное кровообращение и микроциркуляция.* 2011. Т. 10. № 3. С. 31.
24. *Mayrovitz H.N., Groseclose E.E.* Inspiration-induced vascular responses in finger dorsum skin // *Microvasc. Res.* 2002. V. 63. № 2. P. 227.
25. *Крупаткин А.И.* Влияние симпатической иннервации на тонус микрососудов и колебания кровотока кожи // *Физиология человека.* 2006. Т. 32. № 5. С. 95.

26. *Shaffer F., Ginsberg J.* An overview of heart rate variability metrics and norms // *Front. Public. Health.* 2017. V. 5. P. 258.
27. *Tankanag A.V., Chemeris N.K.* Application of the adaptive wavelet transform for analysis of blood flow oscillations in the human skin // *Phys. Med. Biol.* 2008. V. 53. № 21. P. 5967.
28. *Tankanag A.V., Chemeris N.K.* A method of adaptive wavelet filtering of the peripheral blood flow oscillations under stationary and non-stationary conditions // *Phys. Med. Biol.* 2009. V. 54. № 19. P. 5935.
29. *Bagno A., Martini R.* Wavelet analysis of the Laser Doppler signal to assess skin perfusion // *Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.* 2015. V. 2015. P. 7374.
30. *Stauss H.M., Anderson E.A., Haynes W.G., Kregel K.C.* Frequency response characteristics of sympathetically mediated vasomotor waves in humans // *Am. J. Physiol.* 1998. V. 274. № 4. P. 1277.
31. *Kamiya A., Michikami D., Iwase S., Mano T.* Decoding rule from vasoconstrictor skin sympathetic nerve activity to nonglabrous skin blood flow in humans at normothermic rest // *Neurosci. Lett.* 2008. V. 439. № 1. P. 13.
32. *Крупаткин А.И.* Пульсовые и дыхательные осцилляции кровотока в микроциркуляторном русле кожи человека // *Физиология человека.* 2008. Т. 34. № 3. С. 70.
33. *Eckberg D.L.* The human respiratory gate // *J. Physiol.* 2003. V. 548. № 2. P. 339.
34. *Vaschillo E.G., Vaschillo B., Lehrer P.M.* Characteristics of resonance in heart rate variability stimulated by biofeedback // *Appl. Psychophysiol. Biofeedback.* 2006. V. 31. № 2. P. 129.
35. *Steffen P.R., Austin T., DeBarros A., Brown T.* The impact of resonance frequency breathing on measures of heart rate variability, blood pressure, and mood // *Front. Public. Health.* 2017. V. 5. P. 222.
36. *Park G., Vasey M.W., Van Bavel J.J., Thayer J.F.* Cardiac vagal tone is correlated with selective attention to neutral distractors under load // *Psychophysiology.* 2013. V. 50. № 4. P. 398.
37. *Tankanag A.V., Grinevich A.A., Kirilina T.V. et al.* Wavelet phase coherence analysis of the skin blood flow oscillations in human // *Microvasc. Res.* 2014. V. 95. P. 53.

## Periodic Concentration of Mental Attention Changes the Structure of Oscillatory Processes in the Cardiovascular System

**G. V. Krasnikov<sup>a,\*</sup>, M. Y. Tyurina<sup>a</sup>, G. M. Piskunova<sup>a</sup>, A. I. Krupatkin<sup>b,\*\*</sup>,  
A. V. Tankanag<sup>c</sup>, N. K. Chemeris<sup>c</sup>**

<sup>a</sup>*Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University, Tula, Russia*

<sup>b</sup>*Research Institute of Traumatology and Orthopedics named after N.N. Priorov, Moscow, Russia*

<sup>c</sup>*Pushchino Scientific Center for Biological Research of the RAS, Pushchino, Russia*

\*E-mail: gvkrasnikov@gmail.com

\*\*E-mail: krup.61@mail.ru

In this study the subjects were asked to track the low-frequency rhythm of amplitude-modulated acoustic white noise in the series requiring varying degrees of periodic concentration of sensory and motor attention. We measured heart rate variability (HRV), frequency and depth of chest excursions, volumetric blood flow velocity in the skin of the wrist and fingertip, and their spectral characteristics. The study included girls and boys aged 18–25 years with normal blood pressure and without skin disorders, cardiovascular and respiratory diseases. It was found that mental activity in the form of periodic concentration of sensory and motor attention in combination with arbitrary periodic muscular activity has a significant effect on the rhythmic structure of oscillations in the central and peripheral links of the cardiovascular system. For HRV, the dependence of the amplitude of induced oscillations on the frequency of exposure has resonant properties and is described by a bell-shaped curve with a maximum in the range of 0.07–0.1 Hz. For the skin blood flow, the frequency dependence has a non-linear nearly S-shaped pattern. We suppose that induced oscillations of the microcirculatory blood flow in the skin under conditions of periodic concentration of attention are mainly due to the central modulation of the neurogenic (sympathetic) mechanisms of the vascular tone.

*Keywords:* microcirculation, heart rate variability, laser Doppler flowmetry, mental control, central command.