

ВЛИЯНИЕ СЕАНСОВ БИОУПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ РИТМА СЕРДЦА НА ДИНАМИКУ СПЕКТРАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ЭЭГ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ГИПОТЕРМИИ

© 2021 г. Д. Б. Дёмин

ФГБУН Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лавёрова
Уральского отделения Российской академии наук, г. Архангельск

Введение: Определение индивидуальных реакций нервной системы при саморегуляции в экспериментальных условиях холода позволит более точно оценить «физиологическую плату» за адаптацию человека к климатическим факторам Арктики.

Цель: Изучение динамики спектральной мощности электроэнцефалограммы (ЭЭГ) при кардиобиоуправлении (КБУ) в условиях экспериментального воздушного общего охлаждения.

Методы: Обследованы 30 здоровых мужчин-добровольцев в возрасте 18–20 лет. Испытуемые были разделены на две группы: проходившие сеанс биоуправления, повышающего резервы парасимпатической регуляции ритма сердца ($n = 15$) и контроль ($n = 15$). Эксперимент включал пять этапов: I – пребывание в состоянии покоя при температуре $+20$ °С; II – сеанс биоуправления параметрами variability сердечного ритма для группы КБУ (для контрольной – пребывание в состоянии покоя); III – нахождение в условиях холодной камеры при температуре -20 °С в течение 10 мин; IV и V после охлаждения – аналогичны I и II соответственно. ЭЭГ регистрировали во время каждого этапа исследования на портативном электроэнцефалографе «Нейрон-Спектр-СМ».

Результаты: Показано, что за время охлаждения температура тела испытуемых значимо снижалась в среднем на $2,2–2,7$ °С ($p < 0,001$). Выявлено повышение мощности тета- и альфа-активности ЭЭГ у испытуемых в ходе сеансов КБУ, наибольшие изменения достигнуты в динамике сеанса, проведенного после охлаждения (V). У испытуемых группы контроля ко II этапу наблюдалась десинхронизация альфа-ритма с наибольшим снижением в правых лобно-центральных отделах ($p < 0,05$), на этапе согревания (V) значимых изменений тета- и альфа-активности не выявлено. Значимые приросты тета-активности при выполнении КБУ после охлаждения отмечены у испытуемых в левых лобно-центрально-височных отделах ($p < 0,05–0,01$), что вызвано усилением активности подкорковых регуляторных механизмов и усилением парасимпатической активности в ходе сеанса. Повышение мощности альфа-активности, отражающее сочетанное усиленное влияние таламических и стволовых структур, выявлено над всеми участками коры мозга, наиболее значимые приросты отмечены также в левых лобно-центрально-височных отделах ($p < 0,05–0,01$).

Вывод: Проведение предварительного обучающего сеанса КБУ стимулирует центральные структуры вегетативной регуляции и парасимпатическую активность при воздействии холода, обеспечивая более успешную адаптацию к дискомфортным условиям Арктики.

Ключевые слова: электроэнцефалография, variability сердечного ритма, биоуправление, воздушное охлаждение организма, гипотермия

EFFECTS OF HEART RATE VARIABILITY BIOFEEDBACK SESSIONS ON THE DYNAMICS OF THE EEG SPECTRAL POWER DURING EXPERIMENTAL HYPOTHERMIA

D. B. Demin

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Arkhangelsk, Russia

Introduction: Determination of individual reactions of the nervous system during self-regulation under experimental cold conditions has a potential to contribute to better understanding of the “physiological costs” humans “pay” for adaptation to the climatic factors of the Arctic.

Aim: To study the dynamics of the spectral power of the electroencephalogram (EEG) during heart rate variability biofeedback (HRV BF) sessions in experimental hypothermia.

Methods: Thirty healthy male volunteers (18–20 years old) participated in the experiment. The experimental group consisted of men who performed the HRV BF session ($n = 15$) and the control group ($n = 15$). The experiment included five stages: I - rest ($+20$ °С); II - HRV BF session for the experimental group and rest for the control group; III - whole cooling (-20 °С) for 10 min; IV and V - states after cooling, similar to stages I and II, respectively. EEG were recorded during each stage of the study using a portable electroencephalograph “Neuron-Spectrum-SM” (Neurosoft, Russia).

Results: Body temperature significantly decreased on average by $2.2–2.7$ °С ($p < 0.001$) during cooling. An increase in the power of theta- and alpha-activity of the EEG was revealed in the subjects during HRV BF session; the most pronounced changes were observed during stage V. Desynchronization of the EEG alpha-rhythm with the greatest decrease in the right frontal-central regions was observed in subjects of the control group by stage II ($p < 0.05$), and at the stage of rewarming (stage V), no significant changes in theta- and alpha-activities EEG were revealed. Significant increases in theta-activity EEG during HRV BF after cooling were observed in subjects in the left frontal, central and temporal brain parts ($p < 0.05–0.01$), which was caused by an increase in the activity of subcortical regulatory mechanisms and an increase in parasympathetic activity during the HRV BF session. An increase in the power of the EEG

alpha-activity, reflecting the combined enhanced influence of thalamic and brainstem structures, was revealed over all brain parts, the most significant increases were also noted in the left frontal, central and temporal brain parts ($p < 0.05-0.01$).

Conclusion: HRV BF training stimulates the central structures of autonomic regulation and parasympathetic activity when exposed to cold contributing to better adaptation to the climatic conditions of the Arctic.

Key words: electroencephalography, heart rate variability, biofeedback, whole-body cold air exposure, hypothermia

Библиографическая ссылка:

Дёмин Д. Б. Влияние сеансов биоуправления параметрами ритма сердца на динамику спектральной мощности ЭЭГ в условиях экспериментальной гипотермии // Экология человека. 2021. № 10. С. 37–43.

For citing:

Demin D. B. Effects of Heart Rate Variability Biofeedback Sessions on the Dynamics of the EEG Spectral Power during Experimental Hypothermia. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2021, 10, pp. 37-43.

Введение

Существенным фактором окружающей среды, определяющим как физиологические, так и патологические реакции организма человека в Арктике, является низкая температура воздуха [1]. Известно, что холод, как один из основных адаптогенных факторов может запускать приспособительные реакции даже после однократного кратковременного воздействия, при этом изменения, как правило, затрагивают весь организм [3]. Однако ключевыми звеньями, обеспечивающими адекватное функционирование организма в условиях гипотермии, являются нервная и сердечно-сосудистая системы. Эффекты общего охлаждения, приводящего к гипотермии, представлены достаточно широко как в экспериментах на животных, так и с участием людей [7, 11]. Показаны особенности биоэлектрической активности головного мозга в эксперименте при общей гипотермии [5], проводились лонгитюдные изучения индивидуальной чувствительности мозговой активности при воздействии низких температур в естественных условиях Арктики и Антарктики [1]. Весьма подробно описаны эффекты локального кратковременного охлаждения (погружение конечностей в холодную воду) на тонус сосудов и активность головного мозга [17, 18, 22]. Остаётся открытым вопрос о возможностях саморегуляции организма в условиях холода. Известно, что холод провоцирует активизацию симпатического отдела вегетативной нервной системы (ВНС), направленной на усиление термогенеза и сохранение адекватного кровообращения в жизненно важных органах [11]. Однако реакция симпатического отдела ВНС обеспечивает катаболизм и расход метаболических ресурсов, в то время как сохранение ресурсов парасимпатического отдела ВНС призвано поддерживать анаболические процессы организма. То есть сохранение адекватных резервов парасимпатической регуляции сердечной деятельности обеспечивает долговременную адаптацию в дискомфортных условиях среды обитания. Одним из перспективных методов оптимизации функции как сердечно-сосудистой, так и центральной нервной (ЦНС) систем является метод адаптивного биоуправления параметрами variability сердечного ритма (ВСР), при котором происходит усиление вагусных влияний на ритм сердца и снижение явлений симпатикотонии [2, 12]. Установлено, что сеансы кардиобиоуправления (КБУ) с целью повышения общей ВСР вызывают не только снижение артериального давления, но и

оптимизацию работы высших нервных центров [15, 16], а в целом однократный сеанс биоуправления расценивается как тест для определения адаптивных возможностей человека [8]. Однако индивидуальные реакции ЦНС человека при попытке саморегуляции в экспериментальных условиях, моделирующих климатические условия Арктики, требуют дополнительного осмысления.

Цель исследования заключалась в изучении динамики спектральных показателей биоэлектрической активности головного мозга человека при кардиобиоуправлении с учётом условий экспериментального общего охлаждения организма.

Методы

Проведено рандомизированное контролируемое экспериментальное исследование, в котором приняли участие 30 здоровых мужчин в возрасте 18–20 лет, проживающих с рождения в г. Архангельске. Испытуемых выбирали на добровольной основе, от них было получено письменное информированное согласие на участие в эксперименте, одобренном Комиссией по биомедицинской этике ФИЦКИА УрО РАН (протокол № 2 от 28.03.2018). Исследование проводили с соблюдением этических норм, изложенных в Хельсинкской декларации и директивах Европейского сообщества (8/609ЕС). Критерием исключения было наличие в анамнезе травм головного мозга, неврологических и сердечно-сосудистых нарушений. Добровольцы случайным образом были разделены на две равные по количеству группы: «КБУ» (15 человек, $18,8 \pm 0,9$ года) и «Контроль» (15 человек, $19,2 \pm 0,8$ года).

Эксперимент включал пять этапов, в течение которых испытуемые мужчины располагались в положении сидя, в состоянии спокойного бодрствования. На I этапе (5 мин) регистрировали фоновые показатели электроэнцефалограммы (ЭЭГ), ВСР и температуры тела обследуемых – при температуре воздуха $+20$ °С.

На II этапе (5 мин), также при комнатной температуре, испытуемые группы КБУ проходили однократный сеанс КБУ по авторской методике Л. В. Поскотиновой, Ю. Н. Семенова [4]. Для реализации принципа биоуправления в процессе регистрации электрокардиограммы во втором стандартном отведении на аппаратно-программном комплексе «Варикард» («Рамена», г. Рязань) обследуемый получал на экране

монитора информацию о состоянии общей мощности спектра ВСР (дисперсии кардиоинтервалов) [2] в виде линейного графика и цифровых показателей. В динамике сеанса обновление указанных показателей происходило каждые 4 сек. по принципу скользящего окна. Перед началом исследования испытуемого инструктировали о том, что изменение графика на экране монитора зависит от его внутреннего состояния, цель тренинга — увеличение общей мощности спектра ВСР (повышение графика). Состояние, отражающее изменение выбранного параметра, формировалось посредством стратегии «свободного поиска» — создания положительно окрашенных мысленных образов в сочетании со спокойным глубоким дыханием с эффективным плавным выдохом и мышечной расслабленностью. При последующей обработке результатов успешность выполнения процедуры биоуправления оценивали по динамике общей мощности спектра ВСР (Total Power, mc^2). Испытуемые из группы контроля вместо прохождения сеанса КБУ в течение 5 мин оставались в состоянии спокойного бодрствования.

На III этапе изучаемые показатели добровольцев регистрировали в условиях холодной камеры «УШЗ-25Н» («Ксирон-Холод», Москва) при температуре -20°C . Продолжительность охлаждения составляла 10 мин, при этом все испытуемые мужчины были одеты в однотипные легкие хлопчатобумажные костюмы, без верхней одежды, головных уборов и перчаток.

IV и V этапы для обеих групп обследуемых были аналогичны I и II этапам, они проводились после выхода из холодной камеры, при этом изучаемые показатели регистрировали во время согревания при температуре воздуха $+20^\circ\text{C}$.

Электроэнцефалограмму регистрировали с закрытыми глазами, на портативном электроэнцефалографе «Нейрон-Спектр-СМ» («Нейрософт», г. Иваново) монополярно от 16 стандартных отведений, электроды устанавливали по международной системе «10–20», относительно ушных референтных электродов. При оценке ЭЭГ выделяли безартефактные отрезки записи длительностью 60 сек. из заключительных 2 мин каждого этапа исследования, спектр анализировали по тета- (4,0–6,9 Гц) и альфа- (7,0–12,9 Гц) диапазонам. Для количественной оценки спектра ЭЭГ в каждом частотном диапазоне проводили усредненную для каждого испытуемого оценку значений полной мощности (mcV^2). Бета- и дельта-диапазоны ЭЭГ в данной работе не анализировали, поскольку была невозможна программная фильтрация физиологических артефактов, вызванных воздействием холода (миограммы, кожно-гальванической реакции, движений глаз, произвольных холодовых движений головы). Измерение температуры тела добровольцев осуществляли в правом слуховом проходе при помощи медицинского электронного инфракрасного термометра В. Well WF-1000 (Швейцария) [18].

Полученные результаты обрабатывали при помощи компьютерного пакета прикладных программ

Statistica v. 10.0 (StatSoft Inc., США). В связи с тем, что в большинстве случаев распределение признаков в выборках не подчинялось закону нормального распределения (оценка по критерию Шапиро — Уилка), статистическую обработку проводили непараметрическими методами, учитывали медиану (Me) и её процентное изменение между этапами. Для проверки статистической гипотезы разности значений использовали критерии Вилкоксона для двух зависимых выборок, Манна — Уитни и критерий χ^2 (сравнение процентных долей) для двух независимых групп, Краскела — Уоллиса для нескольких независимых групп. Критическим уровнем значимости при проверке статистических гипотез принимали $p < 0,05$.

Сбор и дальнейшее использование первичного материала в рамках данной работы проводили совместно с сотрудниками лаборатории биоритмологии ФИЦКИА УрО РАН д. б. н., доц. Л. В. Поскотиновой, к. б. н. Е. В. Кривоноговой и О. В. Кривоноговой.

Результаты

За время холодого воздействия (к окончанию III этапа) температура в слуховом проходе испытуемых значимо снижалась в группе КБУ в среднем с $(36,3 \pm 0,2)$ до $(33,6 \pm 1,1)^\circ\text{C}$ ($p < 0,001$) и в группе контроля с $(36,3 \pm 0,3)$ до $(34,1 \pm 1,3)^\circ\text{C}$ ($p < 0,001$). При согревании (на IV и V этапах) температура в слуховом проходе испытуемых в обеих группах значимо возрастала, однако и через 10 мин после окончания холодого воздействия не достигала исходного уровня: $(35,7 \pm 0,4)^\circ\text{C}$ в группе КБУ ($p < 0,001$) и $(35,7 \pm 0,7)^\circ\text{C}$ в группе контроля ($p < 0,001$). Динамика общей мощности спектра ВСР (Total Power) ожидаемо была разнонаправленной и значимо отличалась на II и V этапах у испытуемых из групп КБУ и контроля ($p < 0,001$). Total Power, как управляемый показатель, у лиц из группы КБУ значимо повышалась ($p < 0,001$) в ходе обоих сеансов биоуправления в сравнении с исходными показателями: $3\ 625\text{--}6\ 788\ \text{mc}^2$ (I–II этап), $5\ 356\text{--}8\ 197\ \text{mc}^2$ (IV–V этап), достигая к V этапу максимума от исходных значений I этапа ($p < 0,001$). У испытуемых из группы контроля значимых изменений данного показателя не происходило: $3\ 120\text{--}2\ 842\ \text{mc}^2$ (I–II этап), $4\ 332\text{--}3\ 306\ \text{mc}^2$ (IV–V этап).

Процентное изменение спектральной мощности тета-диапазона ЭЭГ в динамике исследования при сравнении фоновых значений и показателей этапа биоуправления / спокойного бодрствования, а также до и после общего охлаждения представлено на рис. 1.

У испытуемых из группы КБУ отмечена тенденция к повышению тета-активности в динамике сеанса биоуправления, проводимого до охлаждения, а наиболее значимые приросты происходят уже после охлаждения преимущественно за счёт левых лобных ($p < 0,01$), центральных ($p < 0,05$) и височных областей мозга ($p < 0,01$). При этом после охлаждения данное повышение было более активным, чем до охлаждения, билатерально во всех отделах мозга ($p < 0,05\text{--}0,01$)

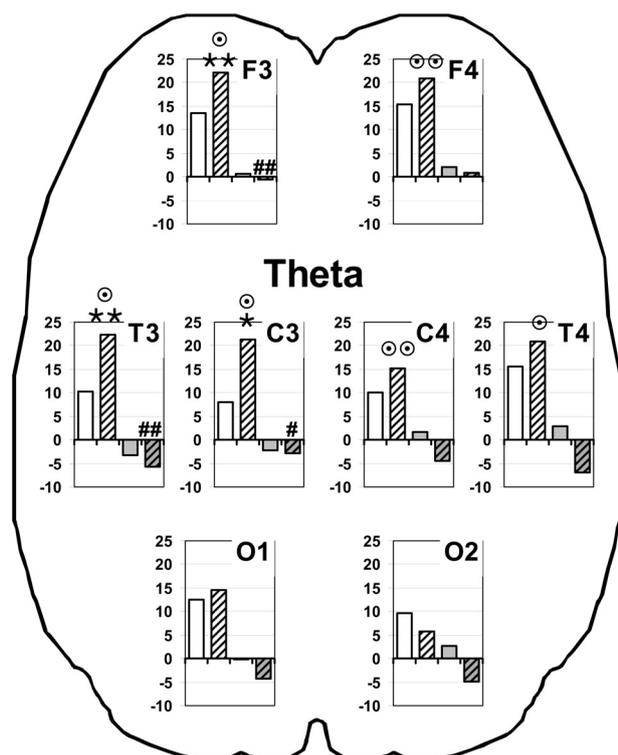


Рис. 1. Изменение (в процентах) спектральной мощности тета-диапазона ЭЭГ у мужчин в динамике эксперимента

Примечания для рис. 1 и 2: F3, F4, C3, C4, T3, T4, O1, O2 – левые и правые лобные, центральные, височные и затылочные отведения ЭЭГ. Белые столбики – группа КБУ до охлаждения; белые заштрихованные столбики – группа КБУ после охлаждения; серые столбики – группа контроля до охлаждения; серые заштрихованные столбики – группа контроля после охлаждения. Статистически значимое отличие между показателями фонового состояния и БОС-тренинга: * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$; # – между группами КБУ и контроля на одном этапе исследования; ⊙ – между этапами до и после охлаждения у одной группы.

кроме затылочных. Наименьшие изменения мощности тета-активности в динамике эксперимента наблюдались у представителей группы контроля ($p > 0,05$) с тенденцией к снижению показателя, особенно после охлаждения. Наиболее значимая разница в изменениях мощности тета-диапазона ЭЭГ у группы контроля в сравнении с группой КБУ отмечена в левых лобных ($p < 0,01$), центральных ($p < 0,05$) и височных ($p < 0,01$) областях мозга на этапе после охлаждения.

Динамика изменения спектральной мощности альфа-диапазона ЭЭГ в целом повторяет таковую для тета-диапазона (рис. 2). Значимые приросты показателя преимущественно в левой гемисфере происходят у испытуемых группы КБУ в ходе сеанса биоуправления, проводимого после охлаждения.

Следует отметить определённые топические особенности, указывающие на то, что данные приросты происходят не столько за счёт затылочных областей ($p < 0,05$), где градиент представленности альфа-ритма в норме должен быть максимальным, сколько более активно показатель прирастает за счёт левых лобно-центральных ($p < 0,01$) и височной ($p < 0,05$) областей, где максимальные приросты достигают 30 %. Значимые изменения между этапами до и по-

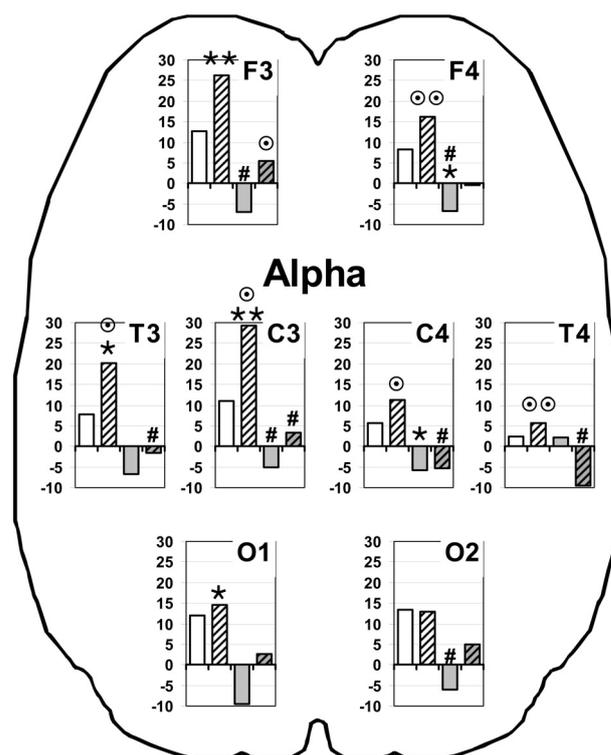


Рис. 2. Изменение (в процентах) спектральной мощности альфа-диапазона ЭЭГ у мужчин в динамике эксперимента. Обозначения – см. рис. 1.

сле охлаждения в группе КБУ отмечены в лобных, центральных и височных областях обоих полушарий мозга ($p < 0,05–0,01$). У представителей группы контроля изменения между I и II этапами до охлаждения проявлялись преимущественно в десинхронизации альфа-ритма с наиболее значимым его снижением в правых лобно-центральных областях ($p < 0,05$). Изменения мощности альфа-активности между IV и V этапами после охлаждения были разнонаправленными, и проявлялись незначительным повышением в затылочных и левых лобно-центральных областях ($p < 0,05$ в сравнении с динамикой до охлаждения), а в правых центральных и височных областях отмечено незначительное снижение показателя. Значимые различия в изменениях мощности альфа-диапазона ЭЭГ у группы контроля в сравнении с группой КБУ до охлаждения отмечены в обеих лобных ($p < 0,05$), левой центральной ($p < 0,05$) и правой затылочной ($p < 0,05$) областях, а после охлаждения билатерально в центральных ($p < 0,05$) и височных ($p < 0,05$) областях мозга.

Обсуждение результатов

Гипотермия является состоянием организма, при котором температура тела падает ниже, чем необходимо для поддержания нормального обмена веществ и функционирования организма. По степени снижения температуры тела на этапе общего охлаждения ($33,6–34,1$ °C) гипотермию, экспериментально созданную у испытуемых, можно отнести к мягкой, а по длительности воздействия – к кратковременной [13].

Возбуждение кожных холодовых рецепторов активирует центры терморегуляции, расположенные в гипоталамусе. При охлаждении увеличение притока нервных импульсов от холодовых рецепторов кожи в гипоталамус индуцирует высвобождение норадреналина из нервных окончаний, а также рост его концентрации в крови за счёт увеличения секреции надпочечниками и вызывает активизацию симпатического отдела ВНС [3]. Показано, что возбуждение симпатического отдела с последующей гипоактивацией префронтальной коры мозга способствует релаксации функции миндалин и, как следствие, повышению церебральных влияний на регуляцию сердечной деятельности и снижению ВСП [21]. Низкая ВСП является предвестником внезапной сердечной (коронарной) смерти, при которой нарушаются регуляторные связи в системе «мозг – сердце» [6]. Обучение саморегуляции на основе биоуправления параметрами ВСП с целью поддержания вагусных влияний на ритм сердца при охлаждении позволяет снизить катаболическое действие симпатического отдела ВНС на функции сердечно-сосудистой и центральной нервной систем, что повышает адаптивные возможности организма в условиях холода [11].

В рамках текущего исследования все представители группы КБУ смогли успешно выполнить оба сеанса биоуправления. В ходе этих сеансов происходило изменение амплитуды и частоты волн кардиоинтервалограммы и увеличение общей мощности спектра ВСП. Учитывая, что *Total Power*, в отличие от стандартного отклонения кардиоинтервалов (SDNN), при коротких записях содержит минимальный вклад неперiodических (недыхательных) волн, можно полагать, что эффект биоуправления достигается за счёт увеличения вклада в первую очередь дыхательной и барорефлекторной составляющих спектра ВСП, что свидетельствует об усилении влияния парасимпатического отдела ВНС на ритм сердца [2, 12]. У лиц из группы контроля ожидаемо не происходило каких-либо значимых изменений показателей ВСП в динамике I–II и IV–V этапов.

Одним из факторов, обеспечивающих снижение теплопотерь при адаптации человека к холоду, является уменьшение частоты дыхания и объёма лёгочной вентиляции при повышении утилизации кислорода из вдыхаемого воздуха [3]. Заложенное в реализации принципа кардиобиоуправления уменьшение частоты дыхания, сопровождаемое увеличением продолжительности выдоха [4], обеспечивает более длительный контакт тёплого влажного альвеолярного воздуха с охлаждённой при вдохе слизистой верхних дыхательных путей и способствует более эффективному возврату тепла и влаги, затраченных на кондиционирование воздуха. Показано, что у адаптированных к полярным широтам людей увеличены просветы мелких бронхов и бронхиол, а также альвеолярная поверхность и количество сурфактанта на поверхности альвеол, что способствует улучшению диффузии кислорода [1, 3].

В литературе существует множество доказательств того, что релаксация и медитация, сопутствующие биоуправлению, могут оказывать выраженные эффекты на ВНС и ЦНС [2, 12]. Увеличение мощности тета- и альфа-активности над всеми точками конвексительной поверхности скальпа у представителей группы КБУ в ходе биоуправления отражает доминирующую роль восходящих активирующих влияний ретикулярной формации, либо таламических структур на всю кору больших полушарий. Нейроны таламуса, в частности медиа-дорзальное ядро таламуса, не только участвуют в генерации тета- и альфа-колебаний [10], но и вовлечены в нейронные сети, обеспечивающие кортико-висцеральные связи, в свою очередь обеспечивающие функцию проводящей системы сердца [9]. Сочетанное усиленное влияние таламических и стволовых структур на биоэлектрогенез коры обуславливает усиление тета- и альфа-активности в центральных и передних областях мозга [14]. При этом прослеживается асимметрия кардиоваскулярных эффектов: симпатические обусловлены правосторонней, а парасимпатические левосторонней доминантой мозговой активностью [19]. В целом это свидетельствует об оптимизации корково-подкорковых взаимоотношений, способствующих уменьшению активности симпатического отдела ВНС, и отражает процесс относительного снижения уровня напряжения и психофизиологической активности. В работе [20] было показано, что внутренняя направленность внимания, усиленная инструкцией по подсчёту вдохов, активирует медленный альфа-ритм в лобных долях и ингибирует симпатическую активность. В нашей работе мы также можем говорить о состоянии, сопровождающемся определённой внутренней сосредоточенностью, на основании данной испытуемому инструкции по контролю дыхания и мышечного тонуса.

Испытуемые из группы КБУ подвергались охлаждению с уже модифицированным вегетативным статусом и балансом периферических и центральных структур нервной регуляции сердечной деятельности. Охлаждение организма вызывает дополнительную активизацию прежде всего диэнцефальных структур мозга, где сосредоточены центры терморегуляции, вегетативной регуляции внутренних органов и т. д. [17], этим, возможно, обусловлено более значимое повышение тета-активности у представителей группы КБУ при биоуправлении после воздействия холода, а также дополнительная синхронизация альфа-ритма, сопровождающая процесс согревания.

Стоит отметить, что мощность бета-диапазона ЭЭГ значимо повышалась у наших испытуемых при холодном воздействии, но в большинстве случаев это происходило за счёт присоединения артефакта миограммы, сопутствующего холодному дрожанию, поэтому динамические изменения высокочастотной ЭЭГ в условиях нашего эксперимента нуждаются в отдельном последующем рассмотрении. Исходя из классификации поверхностной электромиограммы

Ю. С. Юсевича (1972), частота колебаний большинства её типов укладывается в 21–100 Гц, что частично совпадает с бета-активностью ЭЭГ. Существуют несколько механизмов повышения теплопродукции мышечной системой [3], один из них — терморегуляторный мышечный тонус. Он представляет собой нерегулярные частые сокращения отдельных пучков мышечных волокон внешне покоящихся скелетных мышц. Обычно в его создании участвуют мышцы головы и шеи. На электромиограмме это выглядит как непрерывная последовательность биопотенциалов от 10 до 50 мкВ. Этот тип мышечной активности увеличивает теплопродукцию целого организма на 15–50 %, всегда приводит к увеличению потребления кислорода и не сопровождается увеличением периферического кровотока, что позволяет избежать потерь сгенерированного тепла.

Таким образом, показано повышение мощности тета- и альфа-активности ЭЭГ у испытуемых в ходе сеансов кардиобиоуправления, однако наибольшие изменения церебральной активности достигнуты в динамике сеанса, проведенного после экспериментального кратковременного воздушного общего охлаждения, вызывающего дополнительную активизацию прежде всего диэнцефальных структур мозга. Наибольшие приросты медленных волн при выполнении кардиобиоуправления после охлаждения отмечены в левых лобно-центрально-височных отделах, что детерминировано усилением активности подкорковых регуляторных механизмов с ростом доминирования лимбико-ретикулярных влияний и усилением парасимпатических кардиоваскулярных эффектов в ходе сеанса. Формирование церебральных ответов в альфа-диапазоне у испытуемых выражается в генерализованном усилении активности над всеми участками коры мозга с некоторым смещением градиента также в левые передние, центральные и височные его отделы, что отражает сочетанное усиленное влияние таламических и стволовых структур на биоэлектrogenез коры. У представителей группы контроля этап продолжающегося спокойного бодрствования до охлаждения сопровождался преимущественно десинхронизацией альфа-ритма с наибольшим его снижением в правых лобно-центральных отделах, а этап согревания демонстрировал относительную стабильность тета- и альфа-активности. Способность обследованных мужчин изменять активность параметров ритма сердца в ходе кардиобиоуправления также определяет степень его воздействия и на функции центральных структур вегетативной регуляции. В целом проведение предварительного обучающего сеанса биоуправления параметрами ВСР активно стимулирует вагусные влияния на ритм сердца при воздействии холода и, по-видимому, в дальнейшем позволит нивелировать возможные проявления излишней симпатикотонии, возникающие при более продолжительном общем охлаждении организма.

Работа выполнена в рамках темы ФНИР ИФПА ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН № АААА-А19-119120990083-9.

Авторство

Дёмин Д. Б. разработал концепцию, дизайн исследования, осуществил получение первичных данных, их анализ и интерпретацию, написал текст статьи.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Дёмин Денис Борисович — ORCID 0000-0001-7912-9226; SPIN 6565-4657

Список литературы / References

1. Новиков В. С., Сороко С. И. Физиологические основы жизнедеятельности человека в экстремальных условиях. СПб.: Политехника-принт, 2017. 476 с.
Novikov V. S., Soroko S. I. *Fiziologicheskie osnovy zhiznedeyatel'nosti cheloveka v ekstremal'nykh usloviyakh* [Physiological Bases of Human Activity in Extreme Conditions]. Saint Petersburg, 2017, 476 p. [In Russian]
2. Поскотнинова Л. В., Демин Д. Б., Кривоногова Е. В., Диева М. Н., Хасанова Н. М. Успешность биоуправления параметрами вариабельности сердечного ритма у лиц с различным уровнем артериального давления // Вестник Российской академии медицинских наук. 2013. Т. 68, № 7. С. 20–23.
Poskotinova L. V., Demin D. B., Krivonogova E. V., Dieva M. N., Khasanova N. M. The success of heart rate variability biofeedback parameters in persons with different levels of blood pressure. *Vestnik Rossiiskoi akademii meditsinskikh nauk* [Annals of the Russian Academy of Medical Sciences]. 2013, 68 (7), pp. 20-23. [In Russian]
3. Салтыкова М. М. Физиологические механизмы адаптации к холоду // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2016. Т. 50, № 4. С. 5–13.
Saltykova M. M. Physiological mechanisms of adaptation to cold. *Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina*. 2016, 50 (4), pp. 5-13. [In Russian]
4. Способ коррекции вегетативных дисбалансов с помощью комплекса для обработки кардиоинтервалограмм и анализа вариабельности сердечного ритма «Варикард 2.51», работающего под управлением компьютерной программы ISCIM 6.1 (BUILD 2.8), с использованием биологической обратной связи: пат. 2317771 Рос. Федерация / Л. В. Поскотнинова, Ю. Н. Семенов; Институт физиологии природных адаптации УрО РАН; опубли. 27.02.2008. Бюл. № 6.
Sposob korrektsii vegetativnykh disbalansov s pomoshch'yu kompleksa dlya obrabotki kardiointervalogramm i analiza variabel'nosti serdechnogo ritma «Varikard 2.51», rabotayushchego pod upravleniem komp'yuternoï programmy ISCIM 6.1 (BUILD 2.8), s ispol'zovaniem biologicheskoi obratnoi svyazi. Pat. 2317771 Ros. Federatsiya. L. V. Poskotinova, Yu. N. Semenov, Institut fiziologii prirodnykh adaptatsii UrO RAN, opubl. 27.02.2008. Byul. N 6 [Method for correcting vegetative misbalance states with Varicard complex for processing cardiointervalograms and analyzing cardiac rhythm variability, operating under computer software program with biofeedback. Patent RU 2317771. Poskotinova L. V., Semenov Yu. N. Application: 2006110652/14, 03.04.2006. Date of publication 27.02.2008].
5. Chang P. F., Arendt-Nielsen L., Chen A. C. N. Dynamic changes and spatial correlation of EEG activities during cold pressor test in man. *Brain Research Bulletin*. 2002, 57 (5), pp. 667-675.
6. Critchley H. D., Taggart P., Sutton P. M. Mental stress and sudden cardiac death: asymmetric midbrain activity as a linking mechanism. *Brain*. 2005, 128 (1), pp. 75-85.

7. Dhaka A., Murray A. N., Mathur J., Earley T. J., Petrus M. J., Patapoutian A. TRPM8 is required for cold sensation in mice. *Neuron*. 2007, 54, pp. 371-378.

8. Guijt A. M., Sluiter J. K., Frings-Dresen M. H. Test-retest reliability of heart rate variability and respiration rate at rest and during light physical activity in normal subjects. *Arch. Med. Res.* 2007, 38 (1), pp. 113-120.

9. Kimmery D. S., O'Leary D. D., Menon R. S. Cortical regions associated with autonomic cardiovascular regulation during lower body negative pressure in humans. *The Journal of Physiology*. 2005, 569 (1), pp. 331-345.

10. Klimesch W. EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis. *Brain Res. Rev.* 1999, 29 (2-3), pp. 169-195.

11. Krivonogova O. V., Krivonogova E. V., Poskotinova L. V. Sustained Attention and Types of Dynamics of Cardiovascular Reactivity during a Short-Term, Human Whole-Body Exposure to Cold Air. *International Journal of Biomedicine*. 2020, 10 (4), pp. 407-411.

12. Lehrer P. M., Gevirtz R. Heart rate variability biofeedback: how and why does it work? *Front Psychol*. 2014, 5, pp. 756-765.

13. Louie J. P. *Hypothermia and Cold-Related Injuries*. *Comprehensive Pediatric Hospital Medicine*. Ed. by Zaoutis L. B., Chiang V. W. Philadelphia, Elsevier Inc., 2007, pp. 1153-1157.

14. Maier S. F., Watkins L. R. Role of the medial prefrontal cortex in coping and resilience. *Brain Research*. 2010, 1355, pp. 52-60.

15. McGrady A. The effects of biofeedback in diabetes and essential hypertension. *Cleveland Clinic Journal of Medicine*. 2010, 77 (3), pp. 68-71.

16. Moravec C. S. Biofeedback therapy in cardiovascular

disease: Rationale and research overview. *Cleveland Clinic Journal of Medicine*. 2008, 75 (2), pp. 35-38.

17. Morrison S. F., Nakamura K. Central neural pathways for thermoregulation. *Frontiers in Bioscience*. 2011, 16 (1), pp. 74-104.

18. Niven D. J., Gaudet J. E., Laupland K. B., Mrklas K. J., Roberts D. J., Stelfox H. T. Accuracy of peripheral thermometers for estimating temperature: a systematic review and meta-analysis. *Ann. Intern. Med.* 2015, 163 (10), pp. 768-777.

19. Oppenheimer S. M., Gelb A., Girvin J. P., Hachinski V. C. Cardiovascular effects of human insular cortex stimulation. *Neurology*. 1992, 42, pp. 1727-1732.

20. Takahashi T., Murata T., Yamada T. Changes in EEG and autonomic neurons activity during meditation and their association with personality traits. *Int. J. Psychophysiol*. 2005, 55 (2), pp. 199-207.

21. Thayer J. F., Lane R. D. Claude Bernard and the Heart-Brain Connection: Further Elaboration of a Model of Neurovisceral Integration. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2009, 33 (1), pp. 81-88.

22. Tyler C. J., Reeve T., Cheung S. S. Cold-induced vasodilation during single digit immersion in 0 °C and 8 °C water in men and women. *PLoS One*. 2015, 10 (4), e0122592.

Контактная информация:

Дёмин Денис Борисович — доктор медицинских наук, старший научный сотрудник лаборатории биоритмологии ФГБУН Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н. П. Лаврёва Уральского отделения Российской академии наук

Адрес: 163000, г. Архангельск, пр. Ломоносова, д. 249
E-mail: denisdemin@mail.ru