

Влияние упражнений йоги с произвольными изменениями вентиляции легких на интракраниальный артериальный кровоток

А.В. Фролов¹, С.А. Ермолаева¹, М.Д. Дидур²

¹ ООО «Санкт-Петербургский институт восточных методов реабилитации», Россия, Санкт-Петербург

² ФГБУ «Институт мозга человека имени Н.П. Бехтерева РАН», Россия, Санкт-Петербург

РЕЗЮМЕ

Введение. Дыхательные упражнения йоги с произвольными изменениями параметров вентиляции легких потенциально способны оказывать воздействие на мозговое кровообращение за счет изменений содержания CO_2 в артериальной крови. **Цель.** Оценка влияния дыхательных упражнений йоги с изменениями уровня легочной вентиляции на параметры кровотока в средней мозговой артерии (СМА). **Методы.** В исследовании приняли участие 21 человек, способные выполнять упражнения йоги с частотой дыхания (ЧД) 3–3,5/мин и 1–1,5/мин. Средний возраст участников составил $39,5 \pm 8,7$ лет. В течение 5 минут участники выполняли свободное дыхание (этап 1), дыхание с ЧД=3–3,5/мин (этап 2), и с ЧД=1–1,5/мин (этап 3). На 2 и 3 этапах участниками выполнялась техника «полное дыхание» с максимально глубоким вдохом и выдохом. Методом спиро-газоанализа регистрировалась частота дыхания (ЧД), дыхательный объем (ДО), минутный объем дыхания (МОД), парциальное давление CO_2 в выдыхаемом воздухе в конце выдоха (PetCO_2) и процентное содержание кислорода в выдыхаемом воздухе (FeO_2). Методом транскраниального дуплексного сканирования в правой СМА регистрировалась пиковая систолическая скорость кровотока V_{ps} и конечная диастолическая скорость кровотока V_d (см/с), усредненная по времени максимальная скорость кровотока TAMAX, а также индекс резистентности RI. Рассчитывался индекс вариации скорости (ИВС) для каждого этапа. **Результаты.** По сравнению с 1 этапом 2 этап (ЧД=3–3,5/мин) сопровождался увеличением МОД и FeO_2 , снижением PetCO_2 , снижением V_{ps} , V_d , TAMAX и увеличением RI. ИВС при этом статистически незначимо уменьшился. 3 этап (ЧД=1–1,5/мин) по сравнению 1 этапом сопровождался увеличением PetCO_2 , уменьшением МОД и FeO_2 , а также увеличением V_{ps} , V_d , TAMAX и снижением RI. ИВС при этом значимо увеличивался. **Выводы.** Выполнение дыхательных упражнений йоги с частотой дыхательных движений 3–3,5/мин и 1–1,5/мин приводит к разнонаправленным сдвигам параметров вентиляции и газообмена, которые сопровождаются изменениями артериального мозгового кровотока (снижение и повышение скорости кровотока при увеличении и уменьшении МОД соответственно). ИВС, отражающий колебания скорости кровотока значительно возрастает в случае снижения МОД, что может быть связано с вазодилатационным эффектом CO_2 .

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дыхательные упражнения, дуплексное сканирование, спирометрия, газоанализ, мозговое кровообращение, йога.
КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The influence of yoga exercises with voluntary pulmonary ventilation changes on intracranial arterial blood flow

Artem V. Frolov¹, Sargylana A. Ermolaeva¹, Michael D. Didur²

¹ St. Petersburg Institute of Oriental Rehabilitation Methods, St. Petersburg, Russia

² Bekhtereva Human Brain Institute of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

SUMMARY

Introduction. Yoga breathing exercises that involve voluntary changes in pulmonary ventilation parameters can potentially influence cerebral circulation due to changes in CO_2 content in arterial blood. **Objective.** To assess the effect of yoga breathing exercises with changes in pulmonary ventilation levels on blood flow parameters in the middle cerebral artery (MCA). **Methods.** The study included 21 participants, with an average age of 39.5 ± 8.7 years, who were capable of performing yoga exercises at respiratory rates (RR) of 3–3.5/min and 1–1.5/min. For 5 minutes, participants underwent three stages: free breathing (stage 1), breathing with $\text{RR}=3\text{--}3.5/\text{min}$ (stage 2), and breathing with $\text{RR}=1\text{--}1.5/\text{min}$ (stage 3). During stages 2 and 3, the «full breathing» technique, which involves maximum deep inhalation and exhalation, was employed. Respiratory rate (RR), tidal volume (TI), minute ventilation (MV), end-tidal CO_2 partial pressure (PetCO_2), and oxygen fraction in exhaled air (FeO_2) were recorded using spiro-gas analysis. Transcranial duplex scanning was used to measure peak systolic blood flow velocity (V_{ps}), end-diastolic blood flow velocity (V_d), time-averaged maximum blood flow velocity (TAMAX), and resistance index (RI) in the right MCA. The velocity variation index (VVI) was calculated for each stage. **Results.** Compared to stage 1 (free breathing), stage 2 ($\text{RR}=3\text{--}3.5/\text{min}$) showed an increase in MV and FeO_2 , a decrease in PetCO_2 , and reductions in V_{ps} , V_d , and TAMAX, with an increase in RI. VVI decreased statistically insignificantly. In stage 3 ($\text{RR}=1\text{--}1.5/\text{min}$), compared to stage 1, there was an increase in PetCO_2 , a decrease in MV and FeO_2 , and increases in V_{ps} , V_d , and TAMAX, with a decrease in RI. VVI increased significantly. **Conclusions.** Yoga breathing exercises at respiratory rates of 3–3.5/min and 1–1.5/min result in multidirectional shifts in ventilation and gas exchange parameters, leading to changes in arterial cerebral blood flow (a decrease and increase in blood flow velocity with an increase and decrease in MV, respectively). VVI, reflecting fluctuations in blood flow velocity, increases significantly with reduced MV, likely due to the vasodilatory effect of CO_2 .

KEYWORDS: breathing exercises, duplex scanning, spirometry, gas analysis, cerebral circulation, yoga.

CONFLICT OF INTEREST. The authors declare that they have no conflicts of interest.

Введение

Дыхательные упражнения йоги с произвольными изменениями параметров вентиляции легких потенциально способны оказывать воздействие на мозговое кровообращение за счет изменений содержания CO_2 в артериальной крови. Показано, что в нормальных физиологических условиях между содержанием CO_2 в организме и уровнем мозгового кровотока имеется практически линейная зависимость: повышению PaCO_2 на 1 мм рт. ст. соответствует прирост мозгового кровотока на 1,1–1,3 мл/100 г/мин. Снижение PaCO_2 до 20–25 мм рт. ст. снижает церебральное кровообращение на 40–50% [1].

В исследованиях дыхательных упражнений с использованием транскраниальной доплерографии продемонстрированы разнонаправленные изменения артериального мозгового кровотока: при выполнении техник с частым глубоким дыханием наблюдалось снижение конечной диастолической скорости и средней скорости потока в средней мозговой артерии (СМА); при задержке дыхания имели место противоположные изменения; авторы связывают это с изменениями газообмена – гипокапнией при гипервентиляции и гиперкапнией при задержке дыхания и влиянием PaCO_2 на мозговое кровообращение [2]. Увеличение частоты дыхания до 2 Гц сопровождается снижением конечной диастолической и средней скорости кровотока в СМА, что авторы предположительно объясняют развитием гипервентиляции и гипокапнией [3]. Выполнение дыхательной техники йоги «квадрат пранаямы» с задержками дыхания сопровождается циклическими колебаниями линейной скорости кровотока в СМА в соответствии с фазами дыхания [4].

На сегодняшний день имеется дефицит научных работ, детально рассматривающих влияние произвольных изменений параметров легочной вентиляции на церебральный артериальный кровоток (корреляция показателей вентиляции и газообмена с параметрами мозгового кровотока, цикличность колебаний мозгового кровотока). В проведенных ранее работах регистрировались частота дыхания и изменения мозгового кровотока, но не всегда осуществлялась детальная оценка параметров легочной вентиляции и газообмена, которые являются важнейшими факторами влияния.

Исследование может дать важную информацию о влиянии дыхательных упражнений йоги на интракраниальное артериальное кровообращение и в целом улучшить понимание взаимосвязей процессов дыхания и церебрального кровотока.

Цель исследования – оценка влияния дыхательных упражнений йоги с изменениями уровня легочной вентиляции на параметры кровотока в средней мозговой артерии.

Материалы и методы

Набор участников проводился из числа студентов образовательной программы профессиональной переподготовки по специальности «Тренер» Санкт-Петербургского института восточных методов реабилитации (СПб ИВМР), давших согласие на участие в исследовании, а также ос-

воивших выполнение дыхательных упражнений йоги с частотой дыхания 1–1,5/мин под руководством педагогического состава СПб ИВМР. Исследование одобрено Этическим комитетом Санкт-Петербургского государственного университета в области исследований с привлечением людей (уведомление №115-03-5 от 20.02.2024 г.).

В исследовании приняли участие 21 человек, считающих себя здоровыми, не курящих и не принимающих никаких фармакологических препаратов на постоянной основе. Средний возраст участников составил $39,5 \pm 8,7$ лет. Участники имели опыт регулярной практики дыхательного упражнения «полное дыхание» не менее 6 месяцев. Каждому участнику выполнялся предварительный стандартный протокол исследования брахиоцефальных сосудов для исключения патологии и аномалий развития.

Для оценки параметров вентиляции легких и газообмена использовался модифицированный медицинский спирометр «MAC2-C» с функцией газоанализа и пульсоксиметрии (производство компании «Белинтелмед», г. Минск, Беларусь). При подготовке к исследованию мы столкнулись с тем, что изучение дыхательных упражнений йоги с экстремально низкими скоростями воздушного потока требует особых характеристик, которыми не обладают спирометры, предназначенные для выполнения стандартных дыхательных проб и клинической диагностики.

Дыхательные паттерны с экстраординарно низкими частотами дыхания (1–1,5/мин и менее), имеющие место при упражнениях йоги, отличаются сверхмалыми скоростями движения воздуха на вдохе и выдохе, лежащими на пороге чувствительности стандартного спирометра (100 мл/с и менее). При этом спирометр должен корректно измерять столь малые скорости, а также быть нечувствительным к 100% влажности выдыхаемого воздуха с возможностью образования конденсата в дыхательном сенсоре.

Для выполнения поставленных научных задач компанией «Белинтелмед» был специально спроектирован и изготовлен прибор, способный регистрировать такие паттерны дыхания. В качестве базового был выбран спирогазоанализатор MAC2-C; разработан долговременно стабильный термостабилизированный сенсор потока типа «трубка Флейша» со встроенной метеостанцией, измеряющей температуру, давление и относительную влажность воздуха; термостатирование сенсора потока осуществляется до температуры выдоха с целью предотвращения образования конденсата, чрезвычайно выраженного при требуемых длительностях дыхательных упражнений. Разработка описанной выше оригинальной модели спирогазоанализатора и специального программного обеспечения позволила осуществлять сбор и регистрацию данных для достижения целей исследования.

Регистрация кровотока в правой СМА методом дуплексного сканирования проводилась с использованием ультразвукового сканера VIVID-T8 производства компании General Electric (США). Регистрация выполнялась из транстемпорального доступа секторным фазированным датчиком 2–4 МГц.

Положение обследуемого: сидя на кушетке, ноги опущены вниз. Регистрация данных проводилась в три этапа:

1 этап: на фоне свободного дыхания (контроль); 2 этап: при выполнении испытуемым дыхательной техники йоги «полное дыхание» с ЧД = 3–3,5/мин; 3 этап: при выполнении испытуемым дыхательной техники йоги «полное дыхание» с ЧД = 1–1,5/мин. Регистрация данных спирогазоанализа на каждом этапе длилась в течение 5 минут, данных интракраниального кровотока – непрерывно с 3 по 5 минуту включительно. На 2 и 3 этапах участниками выполнялась техника «полное дыхание» с максимально глубоким вдохом и выдохом. Между 2 и 3 этапами участникам предоставлялся отдых 10 минут.

Методом спирогазоанализа регистрировалась частота дыхания (ЧД), дыхательный объем (ДО), минутный объем дыхания (МОД), парциальное давление CO_2 в выдыхаемом воздухе в конце выдоха (PetCO_2) и процентное содержание кислорода в выдыхаемом воздухе (FeO_2).

Методом транскраниального дуплексного сканирования в правой СМА регистрировалась пиковая систолическая скорость кровотока V_{ps} и конечная диастолическая скорость кровотока V_d (см/сек), усредненная по времени максимальная скорость кровотока TAMAX , а также индекс резистентности RI .

Проводилась оценка изменений (вариаций) максимальной линейной скорости кровотока V_{ps} на каждом этапе (свободное дыхание, ЧД = 3–3,5/мин, ЧД = 1–1,5/мин). Для этого выбирались минимальные и максимальные значения V_{ps} на каждом 3-минутном фрагменте записи и далее рассчитывался индекс вариации скорости (ИВС) по формуле (1):

$$\text{ИВС} = 100 \frac{V_{ps \max} - V_{ps \min}}{\left(\frac{V_{ps \max} + V_{ps \min}}{2} \right)}$$

где $V_{ps \max}$ – максимальная пиковая систолическая скорость; $V_{ps \min}$ – минимальная пиковая систолическая скорость (на зарегистрированном фрагменте).

Статистический анализ проводился с использованием программы StatTech v. 4.2.7 (разработчик – ООО «Статтех», Россия). В случае отсутствия нормального распределения количественные данные описывались с помощью медианы (Me) и нижнего и верхнего квартилей (Q1-Q3). При сравнении трех и более зависимых совокупностей, распределение которых отличалось от нормального, использовался непараметрический критерий Фридмана с апостериорными сравнениями с помощью критерия Коновера – Имана с поправкой Холма. Различия считались статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты

На фоне свободного дыхания (1 этап) ЧД составила 10,01 [9,01–12,33] /мин. По сравнению с 1 этапом режим дыхания с ЧД = 3–3,5/мин (2 этап) сопровождался статистически значимым увеличением МОД и FeO_2 , снижением PetCO_2 (пример протокола спирогазоанализа приведен на рис. 1), а также изменениями параметров кровотока в правой СМА: снижением V_{ps} , V_d , TAMAX и увеличением RI . Индекс вариации скорости (ИВС) при этом по сравнению с исходным уменьшался; изменение было статистически незначимым.

При выполнении дыхания с ЧД = 1–1,5/мин (3 этап) по сравнению с исходным свободным дыханием (1 этап) имело место статистически значимое уменьшение МОД и FeO_2 , увеличение PetCO_2 (пример протокола на рис. 2), а также увеличение V_{ps} , V_d , TAMAX и снижение RI . Индекс вариации скорости (ИВС) при этом увеличивался (изменения ИВС на всех этапах исследования отображены на рис. 3).

На этапе 2 по сравнению с этапом 1 ДО значительно возрастал (так как участники получали установку выполнять дыхательную технику «полное дыхание» с максимально глубоким вдохом и выдохом). На этапе 3

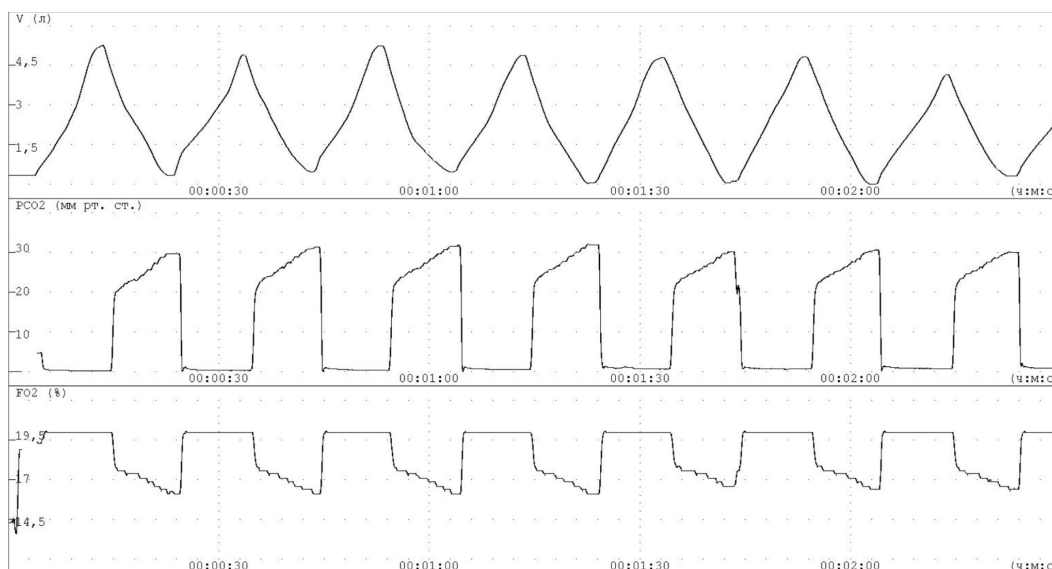


Рисунок 1. Фрагмент протокола спирографии с функцией газоанализа. Регистрируется паттерн дыхания с ЧД = 3/мин. Верхний график — спирографическая кривая: восходящая часть кривой – вдох, нисходящая часть кривой – выдох. Средний график – PCO_2 ; $\text{PetCO}_2 = 30$ мм рт. ст. (при норме 35–45 мм рт. ст.) Нижний график: FO_2 (процентное содержание O_2 в выдыхаемом воздухе), $\text{FeO}_2 = 16,2\%$

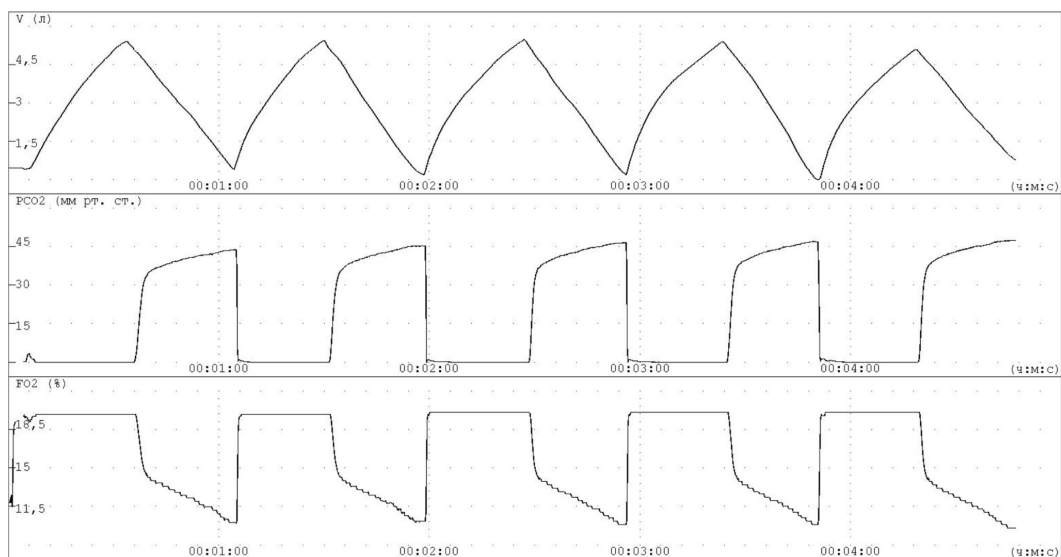


Рисунок 2. Фрагмент протокола спирографии с функцией газоанализа. Регистрируется паттерн дыхания с ЧД = 1,06/мин. Верхний график – спирографическая кривая: восходящая часть кривой – вдох, нисходящая часть кривой – выдох. Средний график – PCO_2 ; $PetCO_2 = 45,1$ мм рт. ст. (при норме 35–45 мм рт. ст.). Нижний график: FO_2 (процентное содержание O_2 в выдыхаемом воздухе), $FeO_2 = 10$ мм рт. ст.

Таблица
Параметры легочной вентиляции, газообмена и кровотока в СМА на всех этапах исследования

	Свободное дыхание Me [Q1–Q3] (1 этап)	ЧД = 3–3,5/минуту Me [Q1–Q3] (2 этап)	ЧД = 1–1,5/минуту Me [Q1–Q3] (3 этап)	p
МОД (л/мин)	7,57 [6,85–8,65]	11,07 [9,52–13,46]	3,90 [3,43–4,76]	< 0,001* $p_{1-2} = 0,005^*$ $p_{1-3} = 0,005^*$ $p_{2-3} < 0,001^*$
ДО (л)	0,78 [0,65–0,88]	3,67 [3,20–4,66]	3,23 [2,79–4,30]	< 0,001* $p_{1-2} < 0,001^*$ $p_{1-3} < 0,001^*$
$PetCO_2$ (мм рт. ст.)	34,90 [33,20–36,50]	29,60 [28,70–31,30]	42,20 [41,50–45,10]	< 0,001* $p_{1-2} = 0,005^*$ $p_{1-3} = 0,005^*$ $p_{2-3} < 0,001^*$
FeO_2 (%)	13,70 [13,40–13,90]	15,90 [15,50–16,10]	10,50 [9,40–11,80]	< 0,001* $p_{1-2} = 0,005^*$ $p_{1-3} = 0,005^*$ $p_{2-3} < 0,001^*$
Vps	91,24 [77,82–108,24]	73,93 [66,03–83,35]	120,40 [101,52–132,73]	< 0,001* $p_{1-2} = 0,003^*$ $p_{1-3} = 0,006^*$ $p_{2-3} < 0,001^*$
Vd	42,23 [34,90–49,01]	27,49 [24,12–37,10]	58,16 [49,71–64,80]	< 0,001* $p_{1-2} = 0,003^*$ $p_{1-3} = 0,006^*$ $p_{2-3} < 0,001^*$
TAMAX	65,71 [52,92–71,55]	47,80 [37,54–54,31]	82,54 [69,55–91,23]	< 0,001* $p_{1-2} = 0,003^*$ $p_{1-3} = 0,006^*$ $p_{2-3} < 0,001^*$
RI	0,56 [0,51–0,59]	0,62 [0,55–0,68]	0,51 [0,47–0,55]	< 0,001* $p_{1-2} = 0,019^*$ $p_{2-3} < 0,001^*$

* – различия показателей статистически значимы ($p < 0,05$)

Используемый метод: критерий Фридмана с апостериорными сравнениями с помощью критерия Коновера-Имана с поправкой Холма.

участники также выполняли технику «полное дыхание» и на этапах 2 и 3 значения ДО не демонстрировали существенных различий.

В таблице представлены суммарные данные о динамике ДО и МОД, содержания CO_2 и O_2 в выдыхаемом воздухе, а также параметров кровотока в правой СМА.

Обсуждение результатов

Мы получили значимые различия в показателях скорости кровотока и резистентности в бассейне СМА при выполнении дыхательных упражнений (2 и 3 этап), в том числе по сравнению с исходным свободным дыханием (1 этап). При этом непрерывная регистрация 3-минут-

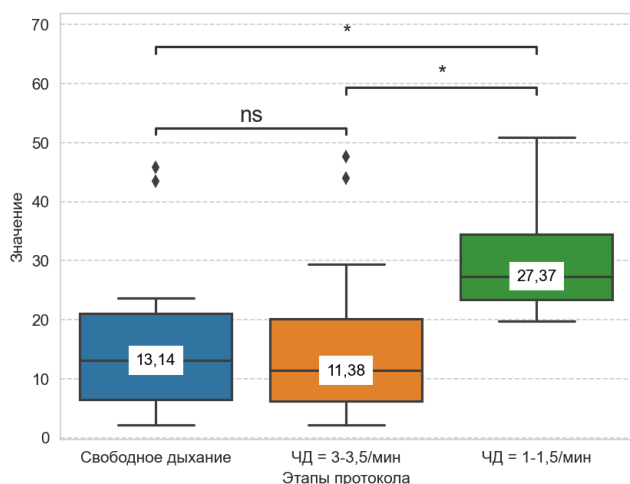


Рисунок 3. Динамика индекса вариации скорости при разных режимах дыхания (* – различия показателей статистически значимы ($p < 0,05$), ns – различия показателей статистически не значимы)

ных фрагментов в импульсном доплеровском режиме демонстрирует, что изменения скорости кровотока при уменьшении и увеличении МОД имеет не постоянный, а волнообразный характер (пример на рис. 4).

Скорости интракраниального артериального кровотока присущи колебания, получившие название В-волн. В-волны – это периодические колебания скорости кровотока и внутричерепного давления (ВЧД). Амплитуда В-волн может варьироваться от 10% до 50% от средней скорости кровотока [6]. Первоначально предполагалось, что В-волны занимают диапазон частот от 0,5 до 2 циклов/мин. Недавно диапазон определен заново от 0,33 до 3 циклов/мин [7]. Непрерывный одновременный мониторинг скорости в СМА и ВЧД показал, что у пациентов, находящихся на ИВЛ, В-волны возникали несмотря на постоянный уровень $PetCO_2$ и артериального давления (АД) [5, 8].

Так как В-волны представляют собой нормальное физиологическое явление, а во время выполнения дыхательных упражнений на 3-минутной записи мы также наблюдали явные колебания скорости кровотока, перед нами встала задача дифференцировать В-волны и колебания скорости, вызванные собственно дыхательными упражнениями. Для этого был применен способ расчета, названный нами индекс вариации скорости (ИВС), формула вычисления которого приведена в разделе «Материалы и методы». Данный способ оценки вариаций скорости ранее был использован в научных работах [11].

В полученных нами данных не выявлено зависимости колебаний скорости от амплитуды дыхательных движений: ДО на этапах 2 и 3 (в обоих случаях – выполнение по возможности максимально глубокого дыхания) не демонстрирует значимых различий; при этом ИВС (характеризующий именно размах вариаций скорости) увеличивается более чем в 2 раза при выполнении упражнения с ЧД = 1–1,5/мин (этап 3) по сравнению с исходным дыханием (этап 1) и с выполнением упражнения с ЧД = 3–3,5/мин (этап 2). Это позволяет сделать вывод, что размах вариации V_{rs} зависит не от амплитуды дыхательных движений и глубины вдоха. Вероятнее, основным фактором, приво-

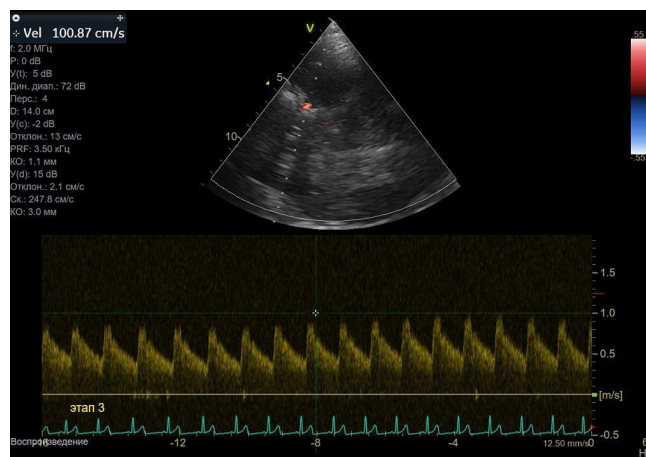


Рисунок 4. Вариации значений V_{rs} на этапе 3 (выполнение упражнения с ЧД=1–1,5/мин). На представленном фрагменте записи импульсной доплерограммы V_{rs} в правой СМА варьирует от 82 до 100 см/с.

дящим к увеличению ИВС, здесь выступают сдвиги газообмена: увеличение уровня CO_2 (как следствие снижения МОД при ЧД = 1–1,5/мин) и влияние CO_2 на тонус резистивных артериол (вазодилатация). Волнообразный характер изменений скорости, наиболее выраженный при уменьшении вентиляции и увеличении $PetCO_2$, может быть связан как с периодическим изменением газового состава альвеолярного воздуха (который обновляется с частотой 1–1,5/мин), так и с периодическим рекрутированием венозной крови (наиболее богатой CO_2) из большого круга кровообращения. Также можно предполагать усиление естественных колебаний скорости (В-волн) увеличением уровня CO_2 , возникающим в результате упражнения.

Как показывают исследования, сдвиги $PetCO_2$ за определенные границы приводят к изменениям системного АД – которое, в свою очередь, является самостоятельным фактором влияния на мозговой кровоток (МК). Повышение $PetCO_2$ более 43 мм рт. ст. при возвратном дыхании приводит к достоверному увеличению АД, тогда как понижение $PetCO_2$ менее 26 мм рт. ст. при гипервентиляции приводит к снижению АД. При изменении $PetCO_2$ от 26 до 43 мм рт. ст. АД не меняется. Когда $PetCO_2$ достигает указанных предельных значений, также происходит значительное изменение цереброваскулярной реактивности на CO_2 . Это означает, что изменения показателей МК в ответ на сдвиги газообмена в пределах значений $PetCO_2$ от 26 до 43 мм рт. ст. отражают «истинную» реактивность на CO_2 мозговых сосудов, независимую от АД [9, 10]. Экстраполируя эти данные на результаты нашей работы, можно предполагать, что сдвиги $PetCO_2$ от 29,6 до 42,4 мм рт. ст. (полученные на группе наших участников, выполнявших паттерны дыхания с ЧД=3–3,5/мин и ЧД = 1–1,5/мин), не вызывают изменений АД и также отражают «истинную» реактивность мозгового артериального русла.

Тем не менее, ограничением данного исследования является отсутствие регистрации системного АД, которое может оказывать свое воздействие на параметры МК при превышении значений $PetCO_2$ более 43 мм рт. ст. –

и хотя на этапе 3 средние значения PetCO₂ по группе в нашем исследовании составляют 42,6 мм рт.ст. (то есть в пределах диапазона от 26 до 43 мм рт. ст., в котором реакция МК на уровень CO₂ представлена в чистом виде без влияния изменений АД), отдельные участники при дыхании с ЧД = 1–1,5/мин достигали значений PetCO₂ 46–47 мм рт. ст. – что могло приводить к изменениям системного АД и влиянию этого фактора на параметры МК.

К ограничениям исследования также следует отнести и то, что регистрация параметров кровотока проводилась унилатерально (в правой СМА). Кроме того, регистрация кровотока в течение лишь 3 минут не позволяет достоверно судить о характере периодики скоростных показателей и взаимосвязи с параметрами легочной вентиляции. Для устранения данных ограничений нужно выполнять более длинные интервалы регистрации с использованием транскраниального доплерографического шлема, фиксирующего датчики билатерально.

Заключение

Выполнение дыхательных упражнений йоги с частотой дыхательных движений 3–3,5/мин и 1–1,5/мин приводит к разнонаправленным сдвигам параметров вентиляции и газообмена, которые сопровождаются изменениями артериального мозгового кровотока (снижение и повышение скорости кровотока при увеличении и уменьшении МОД соответственно). При этом колебания скорости кровотока во время выполнения дыхательных упражнений значительно возрастают в случае снижения вентиляции легких, что может быть связано с вазодилатационным эффектом CO₂.

Дыхательные упражнения со снижением МОД и увеличением PetCO₂ потенциально могут рассматриваться

как элемент реабилитации при дисциркуляторной энцефалопатии, а также как возможный способ профилактики нарушений мозгового кровообращения атеросклеротического генеза; для подтверждения данного тезиса требуются дальнейшие исследования.

Список литературы / References

1. Johnny E. Brian, Jr., M.D. Carbon dioxide and the Cerebral Circulation. *Anesthesiology*. 1998. 88: 1365–1386.
2. Nivethitha L., Mooventhan A., Manjunath N.K., Bathala L., Sharma V.K. Cerebrovascular hemodynamics during pranayama techniques. *J Neurosci Rural Pract*. 2017. Jan–Mar. 8(1): 60–63. doi: 10.4103/0976-3147.193532.
3. Ankur Kumar, Niranjana Kala, Shirley Telles, Cerebrovascular Dynamics Associated with Yoga Breathing and Breath Awareness Int J Yoga 2022 Jan-Apr;15(1):19-24. doi: 10.4103/ijoy.ijoy_179_21. Epub 2022 Mar 21.
4. Joshua A.A. McKay, Cara L. McCulloch, Jordan S. Querido, Glen E. Foster, Michael S. Koehle, A. William Sheel, The effect of consistent practice of yogic breathing exercises on the human cardiorespiratory system, *Respiratory Physiology & Neurobiology* 233 (2016) 41–51. DOI: 10.1016/j.resp.2016.07.005.
5. Newell, D. W., Aaslid, R., Stooss, R., & Reulen, H. J. (1992). The relationship of blood flow velocity fluctuations to intracranial pressure B waves. *Journal of Neurosurgery*, 76(3), 415–421. doi:10.3171/jns.1992.76.3.0415.
6. Newell DW, Nedergaard M and Aaslid R (2022) Physiological Mechanisms and Significance of Intracranial B Waves. *Front. Neurol.* 13:872701. doi: 10.3389/fneur.2022.872701.
7. Andreas Spiegelberg, Matthias Preuß, Vartan Kurtcuoglu, B-waves revisited *Interdisciplinary Neurosurgery: Advanced Techniques and Case Management* 6 (2016) 13–17 <https://doi.org/10.1016/j.inat.2016.03.004>.
8. K.M. Einhüpf, C. Garner, U. Dirnagl, G. Schmieder, P. Schmiedek, G. Kufner, J. Rieder, Oscillations of ICP related to cardiovascular parameters, *Intracranial Pressure VI*, Springer 1986, pp. 290–297. DOI: 10.1007/978-3-642-70971-5_55.
9. Daria V. Kuznetsova, Vladimir P. Kulikov Cerebrovascular and systemic hemodynamic response to carbon dioxide in humans *Blood Press Monit* 19:81–89, 2014 *Wolters Kluwer Health | Lippincott Williams & Wilkins*. DOI: 10.1097/MBP.0000000000000033.
10. В.П. Куликов, Д.В. Кузнецова. Реакция мозгового кровотока и системного артериального давления на гиперкапнию и гипоккапнию у людей. «Патологическая физиология и экспериментальная терапия», июнь, 2013. V.P.Kulikov, D.V.Kuznetsova The response of cerebral blood flow and systemic arterial blood pressure to hypercapnia and hypocapnia in humans. «Patologicheskaja fiziologija i eksperimental'naja terapija» June 2013
11. Song, Y., Kwak, Y. L., Song, J. W., Kim, Y. J., & Shim, J. K. (2014). Respirophasic carotid artery peak velocity variation as a predictor of fluid responsiveness in mechanically ventilated patients with coronary artery disease. *British Journal of Anaesthesia*, 113(1), 61–66. doi:10.1093/bja/aeu057.

Благодарности

Авторы выражают глубокую благодарность профессору, д.м.н. В. П. Куликову и заведующей отделением гематологии СЗГМУ Е. С. Павлюченко за неоценимую помощь в проведении этой работы, а также всем волонтерам, принявшим участие в настоящем исследовании.

Acknowledgements

The authors express their deep gratitude to professor, D.Sc. (Medicine) V.P. Kulikov and chief of the Hematology Department of the North-Western State Medical University E.S. Pavlyuchenko for their invaluable assistance in carrying out this work, as well as to all the volunteers who took part in this study.

Статья поступила / Received
Получена после рецензирования / Revised
Принята в печать / Accepted

Информация об авторах

Фролов Артем Владимирович¹, врач функциональной диагностики
E-mail: polyclinic@list.ru. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8774-6996>
Ермолаева Саргылана Александровна¹, аналитик медицинских данных, методист по адаптивной физкультуре
E-mail: supersagi@gmail.com. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-4754-9255>
Дидур Михаил Дмитриевич², д.м.н., профессор, директор
E-mail: Didour@mail.ru. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-4086-5992>

¹ ООО «Санкт-Петербургский институт восточных методов реабилитации», Россия, Санкт-Петербург

² ФГБУ «Институт мозга человека имени Н.П. Бехтерева РАН», Россия, Санкт-Петербург

Контактная информация:

Фролов Артем Владимирович. E-mail: polyclinic@list.ru

Для цитирования:

Author information

Artem V. Frolov¹, functional diagnostics doctor St. Petersburg Institute of Oriental Rehabilitation Methods, Russian Federation
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8774-6996>
Sargylana A. Ermolaeva¹, medical data analyst
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-4754-9255>
Michael D. Didur², D.Sc. (Medicine), professor, chief at N.P. Bekhtereva Human Brain Institute of the Russian Academy of Sciences
ORCID ID: 0000-0003-4086-5992

¹ St. Petersburg Institute of Oriental Rehabilitation Methods, St. Petersburg, Russia

² Bekhtereva Human Brain Institute of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

Contact information

Artem Frolov. E-mail: polyclinic@list.ru

For citation:

