

Исследование газообмена при разных режимах вентиляции в дыхательных упражнениях йоги

А. В. Фролов¹, И. А. Маничев², С. А. Ермолаева¹

¹ ООО «Санкт-Петербургский институт восточных методов реабилитации»

² ООО «Белинтелмед»

РЕЗЮМЕ

Дыхательные упражнения йоги, развивающие способность произвольной регуляции минутного объема дыхания (МОД) и поддержания состояния гиповентиляции, гипоксии и гиперкапнии, могут рассматриваться как способ гипоксически-гиперкапнического тренинга, потенциально способного влиять на церебральное кровообращение и факторы нейропротекции. Однако на данный момент не разработаны инструментальные способы их регистрации, не изучены особенности дыхательных режимов, влияющих на способность развития произвольной гиповентиляции. **Методы:** В исследовании приняли участие 44 человека (32 мужчины и 12 женщин), регулярно практикующие дыхательные техники йоги с произвольным снижением частоты дыхания с использованием максимального дыхательного объема (ДО). Осуществлялась регистрация свободного дыхания в течение 2 минут, далее каждый испытуемый выполнял доступный ему дыхательный гиповентиляционный паттерн (минимальные значения ЧД с максимальным ДО, вдох и выдох по длительности равны друг другу). Определялись следующие параметры внешнего дыхания: частота дыхания (ЧД), минутный объем дыхания (МОД), дыхательный объем (ДО), парциальное давление CO_2 в выдыхаемом воздухе в конце выдоха (PetCO_2), процентное содержания O_2 в выдыхаемом воздухе (FeO_2) и сатурации гемоглобина (SpO_2). **Результаты:** По сравнению с дыханием в покое ($\text{МОД} = \text{M} \pm \text{SD} 8,51 \pm 2,57$ (95% ДИ 7,72–9,29) л/мин; $\text{PetCO}_2 = \text{M} \pm \text{SD} 36,98 \pm 3,71$ (95% ДИ 35,85–38,11) мм рт. ст.) режим с ЧД = 3/мин (вдох и выдох по 10 с), $n = 44$, приводит к увеличению МОД до $\text{M} \pm \text{SD} 12,02 \pm 3,42$ (95% ДИ 10,98–13,06) л/мин ($p < 0,001$) и снижению CO_2 : $\text{PetCO}_2 = \text{M} \pm \text{SD} 33,99 \pm 3,59$ (95% ДИ 32,90–35,08) мм рт. ст. ($p < 0,001$) — то есть развитию альвеолярной гипоксии. Режим с ЧД = 1,5/мин (вдох и выдох по 20 с), $n = 44$, демонстрирует снижение МОД до $\text{M} \pm \text{SD} 5,95 \pm 1,59$ (95% ДИ 5,46–6,43) л/мин ($p < 0,001$) и рост PetCO_2 до $\text{M} \pm \text{SD} 41,19 \pm 3,71$ (95% ДИ 40,06–42,32) мм рт. ст. ($p < 0,001$). Режим с ЧД = 1/мин (вдох и выдох по 30 с), $n = 24$: при снижении ЧД до 1 раза/мин наблюдалось снижение МОД до $\text{M} \pm \text{SD} 4,22 \pm 0,92$ (95% ДИ 3,83–4,61) л/мин ($p < 0,001$) и рост PetCO_2 до $\text{M} \pm \text{SD} 44,05 \pm 3,05$ (95% ДИ 42,76–45,33) мм рт. ст. ($p < 0,001$). Паттерн дыхания с ЧД = 1 р/мин сопровождается статистически значимым снижением МОД по сравнению с покоем, а также увеличением PetCO_2 и снижением FeO_2 , то есть является гиповентиляционным. Нами предложен коэффициент вентиляции (Квент), представляющий собой отношение МОД/ЖЕЛ, позволяющий судить о том, при каких значениях МОД индивидуум достигает состояния гиповентиляции. Предварительно на данной выборке показано, что дыхательное упражнение становится гиповентиляционным при значениях Квент, равных или меньших 1. При Квент в интервале от 1 до 2 режим вентиляции лежит в рамках нормальных значений, при Квент более 2 имеет место гипервентиляция. **Заключение:** при выполнении дыхательных упражнений йоги наблюдаются вариации МОД как в сторону гипервентиляции, так и в сторону гиповентиляции с соответствующими сдвигами газообмена (гипокапния при гипервентиляции, гиперкапния при гиповентиляции). Значения МОД, при котором индивидуум достигает гиповентиляционного режима, индивидуальны и могут быть спрогнозированы с помощью коэффициента вентиляции (Квент).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: спирометрия, газоанализ, дыхательные упражнения, йога, коэффициент вентиляции.

Study of gas exchange under different modes of ventilation in yoga breathing exercises

A. V. Frolov¹, I. A. Manichev², S. A. Ermolaeva¹

¹ St. Petersburg Institute of Oriental Rehabilitation Methods.

² Belintelmed LLC

SUMMARY

Yoga breathing exercises that develop the ability to voluntarily regulate the minute volume of respiration (MV) and maintain the state of hypoventilation, hypoxia and hypercapnia, can be considered as a way of hypoxic-hypercapnic training, potentially capable of influencing cerebral circulation and neuroprotective factors. However, at the moment, individual anthropometric features that affect the ability to develop a hypoventilation mode of breathing have not been studied, and methodological criteria for training have not been developed. **Methods:** The study involved 44 people (32 men and 12 women) who regularly practice yoga breathing techniques with a voluntary decrease in respiratory rate using maximum tidal volume (TV). Free breathing was recorded for 2 minutes, then each subject performed the respiratory hypoventilation pattern available to him or her (minimum RR values with maximum TV, inhalation and exhalation were of equal duration). The following parameters of external respiration were determined: respiratory rate (RR), minute ventilation (MV), tidal volume (TV), partial pressure of CO_2 in the exhaled air at the end of exhalation (PetCO_2), percentage of O_2 in the exhaled air (FeO_2) and hemoglobin saturation (SpO_2). **Results:** Compared to breathing at rest ($\text{MV} = \text{M} \pm \text{SD} 8,51 \pm 2,57$ (95% CI 7,72–9,29) l/min; $\text{PetCO}_2 = \text{M} \pm \text{SD} 36,98 \pm 3,71$ (95% CI 35,85–38,11) mm Hg), the mode with RR = 3 times/min (inspiration and expiration for 10 s), $n = 44$, leads to an increase in MV up to $\text{M} \pm \text{SD} 12,02 \pm 3,42$ (95% CI 10,98–13,06) l/min ($p < 0,001$) and a decrease of CO_2 : $\text{PetCO}_2 = \text{M} \pm \text{SD} 33,99 \pm 3,59$ (95% CI 32,90–35,08) mm Hg ($p < 0,001$) — that is, to development of alveolar hypoxemia. The mode with RR = 1.5 times/min (inhalation and exhalation for 20 s), $n = 44$, demonstrates a decrease in MV to $\text{M} \pm \text{SD} 5,95 \pm 1,59$ (95% CI 5,46–6,43) l/min ($p < 0,001$) and growth of PetCO_2 up to $\text{M} \pm \text{SD} 41,19 \pm 3,71$ (95% CI 40,06–42,32) mm Hg ($p < 0,001$). The mode with RR = 1 time/min (inspiration and exhalation for 30 s), $n = 24$: with a decrease in RR to 1 time/min, a decrease in MV was observed to $\text{M} \pm \text{SD} 4,22 \pm 0,92$ (95% CI 3,83–4,61) l/min ($p < 0,001$) and an increase in PetCO_2 up to $\text{M} \pm \text{SD} 44,05 \pm 3,05$ (95% CI 42,76–45,33) mm Hg ($p < 0,001$). The breathing pattern with RR = 1 r/min is accompanied by a statistically significant decrease in MV compared to rest, as well as an increase in PetCO_2 and a decrease in FeO_2 , that is, it is hypoventilation. We have proposed a ventilation coefficient (Qvent), which is the ratio MV/VC, which allows us to judge at what values of MV an individual reaches a state of hypoventilation. It was previously shown in this sample that the breathing exercise becomes hypoventilation when Qvent values are equal to or less than 1. With Qvent in the range from 1 to 2, the ventilation mode is within normal values, and when Qvent is more than 2, hyperventilation occurs. **Conclusion:** when performing yoga breathing exercises, variations in MV are observed both in the direction of hypoventilation and in the direction of hyperventilation with corresponding shifts in gas exchange (hypoxemia with hyperventilation, hypercapnia with hypoventilation). The MV values at which an individual reaches hypoventilation vary from person to person and can be predicted using the ventilation coefficient (Qvent).

KEYWORDS: spirometry, gas analysis, breathing exercises, yoga, ventilation coefficient.

ВВЕДЕНИЕ

Дыхательные упражнения являются одним из ключевых элементов хатха-йоги (системы психофизического саморазвития, зародившейся на территории современной Индии более 2000 лет назад) и задействуют основные звенья и структуры внешнего дыхания. Регулярное выполнение дыхательных упражнений йоги оказывает широкий спектр кардиоваскулярных, респираторных и вегетативных физиологических эффектов [1, 2], улучшая дыхательные [3] и когнитивные функции, нормализуя артериальное давление, снижая тревожность, увеличивая парасимпатический тонус [4, 5, 6, 7, 8].

Техники йоги значительно повышают произвольный контроль над процессами дыхания, развивая способность практикующего менять параметры вентиляции легких в широких пределах, варьируя как частоту дыхания (ЧД), так и дыхательный объем (ДО) — и в итоге кардинально меняя величину минутного объема дыхания (МОД). В арсенал дыхательных йогических упражнений входят и гипervентиляционные (с увеличением частоты дыхания до 60–120/мин), и гиповентиляционные техники — со снижением ЧД до 1/мин, соответствующим снижением МОД и поддержанием такого гиповентиляционного режима в течение существенных интервалов времени (30, 60 минут и более). Обычно в подобных техниках дыхания при значительном снижении ЧД и МОД задействуется максимально доступный ДО, по возможности приближенный к ЖЕЛ. Предварительно используются упражнения, направленные на увеличение ЖЕЛ (мобилизация суставов грудной клетки, укрепление дыхательной мускулатуры, увеличение подвижности диафрагмы).

Лишь отдельные работы рассматривают влияние дыхательных техник йоги на газообмен. В работе Miyamura et al. описан эксперимент, в котором участник с опытом регулярных занятий более 20 лет выполнял дыхание с частотой 1/мин в течение одного часа; выполнялось определение PetCO_2 и PetO_2 (парциального давления CO_2 и O_2 в выдыхаемом воздухе в конце выдоха); кроме того, параметры газообмена оценивались «кровяным методом» — путем катетеризации лучевой артерии и забора образцов крови по время эксперимента. В результате было продемонстрировано достижение альвеолярной и артериальной гиперкапнии и гипоксемии, а также респираторного ацидоза [9]. Другое исследование, в котором приняли участие три волонтера, выполнявших дыхание с частотой $1,4 \pm 0,2$ /мин, показало развитие альвеолярной гипоксии и гиперкапнии (изменения не были статистически значимы в силу малого количества участников) [10].

На данном этапе имеет место дефицит научной информации достаточного уровня доказательности о влиянии техник йоги с произвольным поддержанием гиповентиляционного режима дыхания на параметры легочной вентиляции и газообмен. Недостаточно изученным остается и вопрос о тех параметрах (ЧД, ДО, МОД), при которых достигается гипоксический и гиперкапнический режим у практикующих дыхательные упражнения.

При этом, как оказалось, обычное спирометрическое оборудование, применяемое в рутинной клинической практике (даже оснащенное функцией газоанализа — что само по себе уже большая редкость), не предназначено для регистрации экстремально низких величин частоты дыхания (1/мин и менее), а также сверхмалых скоростей движения воздуха на вдохе и выдохе, имеющих место при гиповентиляционных упражнениях йоги (100 мл/с и менее). Поэтому в рамках подобных исследований

первой встает задача проектирования, изготовления и апробации спирометрического оборудования и программного обеспечения, приспособленных для решения подобных задач.

Целью работы было исследование газообмена при разных режимах вентиляции в дыхательных упражнениях йоги. Для достижения цели решались следующие задачи:

1. Разработка медико-технических требований и апробация спирометрического оборудования, оснащенного функцией газоанализа и пульсоксиметрии, для исследования дыхательных паттернов с частотами дыхания менее 1,5/минуту.
2. Выявление закономерностей и взаимосвязей параметров легочной вентиляции и газового обмена при выполнении гиповентиляционных дыхательных упражнений йоги.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании приняли участие 44 человека (32 мужчины и 12 женщин), регулярно практикующие дыхательные техники йоги с произвольным снижением частоты дыхания. Средний возраст участников составил $39,8 \pm 9,3$ (37,0–42,7) года. Участники исследования считали себя здоровыми и не принимали никаких фармакологических препаратов на регулярной основе. Стаж практики дыхательных упражнений в группе составил от 2 до 20 лет не менее 15 минут 3 раза в неделю. Проведение исследования одобрено Этическим комитетом Санкт-Петербургского государственного университета, протокол № 02–251 от 21.06.2023 г.

Измерялись рост и вес, а также выполнялось исследование параметров внешнего дыхания в покое с определением дыхательного паттерна и общепринятых показателей вентиляции как по абсолютной величине, так и в процентах от должных величин (predicted values) с возможностью использования должных нормативов по Клементу, ECSC, Knudson и GLI-2012 (в рамках данного исследования применялись должные значения по Клементу).

Исследования проводились в положении сидя на стуле с прямой спиной при температуре воздуха 20–22 градуса по Цельсию после отдыха в течение 15 минут.

На первом этапе в течение 2 мин в состоянии покоя осуществлялась регистрация свободного дыхания. Определялись следующие параметры дыхательного паттерна: частота дыхания (ЧД), минутный объем дыхания (МОД), дыхательный объем (ДО), а также параметры газообмена — парциальное давление CO_2 в выдыхаемом воздухе в конце выдоха (PetCO_2), процентное содержания O_2 в выдыхаемом воздухе (FeO_2), сатурация гемоглобина кислородом с помощью пульсоксиметра (SpO_2) и частота пульса (ЧП). Все исследования легочной вентиляции и газового обмена выполнялись с использованием спирометра MAC-2C с режимами газоанализа и пульсоксиметрии производства компании «Белинтелмед», г. Минск.

Медико-технические требования к спирогазоанализатору

При подготовке к исследованию мы столкнулись с тем, что изучение гиповентиляционных упражнений йоги с экстремально низкими величинами ЧД и скоростями воздушного потока требует новых технических возможностей, которыми не обладают спирометры, предназначенные для выполнения стандартных дыхательных проб и клинической диагностики.

Стандартный спирометр, выполняющий требования ATS/ERS-2005, ATS/ERS-2019 [11, 12], должен обеспечивать запись

вентиляции в тесте ФЖЕЛ не менее 15 с, в тесте ЖЕЛ — не менее 30 с (большие значения приветствуются) с разрешением по регистрируемому потоку по меньшей мере 100 мл/с и воздушным сопротивлением дыханию не более 150 Па/(л/с). При этом регистрируемые потоки достигают 14 л/с как по вдоху, так и по выдоху, причем весьма значительная часть измеряемых объемов формируется при дыхании со скоростями более 1 л/с.

Дыхательные паттерны с экстремально низкими частотами дыхания (1 раз в минуту и менее), имеющие место при гиповентиляционных упражнениях йоги, характеризуются продолжительностью до 1 часа, реальными сверхмалыми скоростями движения воздуха на вдохе и выдохе, лежащими на пороге чувствительности стандартного спирометра (100 мл/с и менее), на протяжении всей тренировки. При этом спирометр должен корректно измерять столь малые вентиляции с учетом возможного временного дрейфа сигнала, а также быть нечувствительным к 100% влажности выдыхаемого воздуха с возможностью образования конденсата в дыхательном сенсоре на протяжении всей гиповентиляционной тренировки.

В соответствии с целями исследования прибор должен также измерять показатели обмена кислорода O_2 и углекислого газа CO_2 при дыхании в процессе гиповентиляционной тренировки, а также сатурацию гемоглобина кислородом SpO_2 методом пульсоксиметрии.

Поэтому для выполнения поставленных научных задач в части выявления взаимосвязей внешнего дыхания и газового обмена при выполнении дыхательных упражнений йоги компанией «Белинтелмед» (г. Минск, Беларусь) был специально спроектирован и изготовлен прибор, способный регистрировать такие паттерны дыхания. В качестве базового был выбран спирогазоанализатор MAC2-C, сертифицированный для медицинского применения на территории Российской Федерации и обеспечивающий одновременную регистрацию четырех сигналов: вентиляции, концентрации O_2 и парциального давления CO_2 во вдыхаемом/выдыхаемом воздухе, а также фотоплетизмограммы с определением SpO_2 и частоты пульса ЧП.

Для целей исследования был разработан долговременно стабильный термостабилизированный сенсор потока типа «трубка Флейша» со встроенной метеостанцией, измеряющей температуру, давление и относительную влажность воздуха в помещении для непрерывного учета условий BTPS и STPD. Термостатирование сенсора потока осуществляется до температуры выдоха с целью предотвращения образования конденсата, чрезвычайно выраженного при требуемых длительностях гиповентиляционной тренировки, а также его влияния на точность и долговременную стабильность измерений. Измерительный канал спирогазоанализатора, состоящий из вышеописанного сенсора потока в сочетании с высокоточным 14-разрядным цифровым измерительным модулем, имеет следующие характеристики:

- продолжительность непрерывных измерений — не менее 4 ч;
- дрейф показаний за период до 4 ч при проведении непрерывных измерений — не более 50 мл;
- разрешение (порог обнаружения) по регистрируемому потоку — не более 35 мл/с;
- нижняя граница диапазона потоков, в котором обеспечивается точность измерения $\pm 3\%$ — не более 100 мл/с;
- воздушное сопротивление не более 30 Па/(л/с) во всем диапазоне измеряемых потоков.

Программное обеспечение, также впервые разработанное для описываемого спирогазоанализатора, в режиме онлайн в процессе измерения отображает на экране один дыхательный цикл вентиляции V , парциального давления CO_2 , концентрации O_2 , фотоплетизмограмму, а также долговременные тренды дыхательного объема ДО (минутного объема дыхания МОД), частоты пульса ЧП, сатурации гемоглобина SpO_2 , парциального давления углекислого газа в конце выдоха $PetCO_2$ и концентрации кислорода в конце выдоха $FetO_2$. Печатный протокол исследования содержит спирограмму, капнограмму, оксиграмму, значения показателей вентиляции и газового обмена, а также долговременные тренды ДО/МОД, $PetCO_2$, $FetO_2$, ЧП, SpO_2 .

Разработка описанной выше оригинальной модели спирогазоанализатора позволила осуществлять сбор и регистрацию данных для достижения целей исследования.

Каждый испытуемый выполнял доступный ему дыхательный гиповентиляционный паттерн (минимальные значения ЧД с максимальным ДО, вдох и выдох по длительности равны друг другу) в течение 4–6 дыхательных циклов (табл. 1). Длительность вдоха и выдоха контролировалась участником самостоятельно с помощью метронома. Носовое дыхание перекрывалось с помощью пластикового зажима, дыхание производилось через рот в трубку прибора с использованием сертифицированных одноразовых антивирусных и антибактериальных фильтров Vitalograph. При этом проводились регистрация $PetCO_2$ и $FetO_2$ и измерение ЧД, ДО, МОД, SpO_2 и ЧП.

Показатель $PetCO_2$ отражает парциальное давление CO_2 в самом конце горизонтального плато капнограммы выдоха (рис. 1). При этом значение $PetCO_2$ достигает максимума за весь выдох. Норма $PetCO_2$ — в пределах 35–45 мм рт. ст. Значения $PetCO_2$ менее 35 соответствуют альвеолярной и артериальной гипоксии, а значения более 45 — гиперкапнии [13]. Отметим, что при столь длинном выдохе, как в случае нашего исследования (до 30 секунд) $PetCO_2$ может отражать напряжение CO_2 не в артериальной, а в венозной крови.

24 участникам был доступен режим с ЧД 1/мин (вдох и выдох по 30 с), для всех 44 участников была доступна ЧД=1,5/мин (вдох и выдох по 20 с). Помимо свободного дыхания все участники выполняли также режим дыхания с ЧД 3/мин (вдох и выдох по 10 с).

Между этапами 3–6 участнику предоставлялся отдых в течение 5 минут.

Таким образом, всеми участниками выполнялись режимы:

- свободное дыхание в течение 2 мин;
- ЧД 3 /мин (вдох и выдох по 10 с);
- ЧД 1,5/мин (вдох и выдох по 20 с).

24 участника также выполнили режим ЧД 1/мин (вдох и выдох по 30 с).

Методы статистической обработки

Количественные показатели оценивались на предмет соответствия нормальному распределению с помощью критерия Шапиро–Уилка. Количественные показатели описывались с помощью средних арифметических величин (М) и стандартных отклонений (SD), границ 95% доверительного интервала (95% ДИ) или с помощью медианы (Me) и нижнего и верхнего квартилей (Q1–Q3). Для сравнения трех и более связанных групп по нормально распределенному количественному признаку применялся однофакторный дисперсионный анализ с повторными

Таблица 1
Протокол и этапы исследования

Этап исследования	Описание этапа	Длительность, мин	Частота дыхания в мин
1	Определение ЖЕЛ	3–5 (до получения достоверных результатов)	-
2	Регистрация дыхательного паттерна на фоне свободного дыхания	2 минуты	произвольно не регулируется
3	Дыхание «10:10» (вдох и выдох по 10 секунд под метроном, глаза закрыты)	4–6 дыхательных циклов	3
4	Дыхание «20:20» (вдох и выдох по 20 секунд под метроном, глаза закрыты)	4–6 дыхательных циклов	1,5
5	Дыхание «30:30» (вдох и выдох по 30 секунд под метроном, глаза закрыты) ¹	4–6 дыхательных циклов	1
Общее время		25–45 минут	

¹ Дыхательный режим выполняется при условии способности участника к его свободному выполнению.

измерениями. Статистическая значимость изменений показателя в динамике оценивалась с помощью следа Пиллая (Pillai's Trace). Апостериорный анализ проводился с помощью парного t-критерия Стьюдента с поправкой Холма. 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. Статистический анализ данных осуществлен на языке программирования Python v. 3.0 (Python Software Foundation, США).

РЕЗУЛЬТАТЫ

ЧД = 3/мин (вдох и выдох по 10 с), n = 44

По сравнению со свободным дыханием (МОД = $8,51 \pm 2,57$ (7,72–9,29) л/мин; ЧД = $11,16 \pm 3,89$ /мин (9,98–12,34); ДО = $0,72$ (0,68–0,89) л; PetCO₂ = $36,98 \pm 3,71$ (35,85–38,11) мм рт. ст.) режим 10:10 приводит к увеличению МОД до $12,02 \pm 3,42$ (10,98–13,06) л/мин ($p < 0,001$), увеличению ДО до $3,91$ (3,08–4,69) л ($p < 0,001$) и снижению CO₂: PetCO₂ = $33,99 \pm 3,59$ (32,90–35,08) мм рт. ст. ($p < 0,001$) — что ниже нормы и в данном случае свидетельствует о развитии гипервентиляции и гипокании; а также статистически незначимому увеличению FeO₂ до $15,55$ (15,20–16,30)% ($p=0,320$).

ЧД = 1,5/мин (вдох и выдох по 20 с), n = 44

При дыхании с частотой 1,5/мин группа демонстрировала снижение МОД до $5,95 \pm 1,59$ (5,46–6,43) л/мин ($p < 0,001$), увеличение ДО до $4,19$ (2,91–4,75) л ($p < 0,001$) и рост PetCO₂ до $41,19 \pm 3,71$ (40,06–42,32) мм рт. ст. ($p < 0,001$). Данные показатели парциального давления CO₂ находятся в пределах нормы, однако по сравнению со свободным дыханием имеет место статистически значимый прирост значений PetCO₂.

ЧД = 1/мин (вдох и выдох по 30 с), n = 24

Двадцати четырём участникам исследования был доступен режим дыхания с ЧД=1/мин. Таким образом, эти участники были

включены в анализ параметров легочной вентиляции и газообмена во всех четырёх дыхательных режимах (Таблица 2).

При снижении ЧД до 1/мин наблюдалось снижение средних значений МОД до $4,22 \pm 0,92$ (3,83–4,61) л/мин ($p < 0,001$), увеличение ДО до $4,05 \pm 0,91$ (3,66–4,43) л ($p < 0,001$) и рост PetCO₂ до $44,05 \pm 3,05$ (42,76–45,33) мм рт. ст. ($p < 0,001$) — см. табл. 2. На рис. 1 дан пример протокола спирографии с графиками, отображающими уровень PetCO₂ и FeO₂.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Паттерн дыхания с ЧД=3/мин с максимально доступным ДО оказался гипервентиляционным, сопровождаясь статистически значимым увеличением МОД и снижением PetCO₂. Паттерн дыхания с ЧД=1,5/мин сопровождается статистически значимым снижением МОД по сравнению со свободным дыханием, а также увеличением PetCO₂ и снижением FeO₂, при этом данные параметры газообмена остаются в рамках нормальных значений. Паттерн дыхания с ЧД=1/мин сопровождается статистически значимым снижением МОД, увеличением PetCO₂ и снижением FeO₂, то есть является гиповентиляционным.

Средние значения SpO₂ статистически значимо не менялись при выполнении всех дыхательных упражнений (ЧД=3/мин, 1,5/мин и 1/мин) по сравнению с исходными значениями (свободное дыхание) — таким образом, даже предельное снижение ЧД до 1/мин не приводило к развитию устойчивой гипоксемии (если говорить о средних значениях SpO₂ за всё время выполнения упражнения). При этом минимальные значения SpO₂ (достигаемые в процессе выполнения 4–6 дыхательных циклов при каждом варианте дыхательного упражнения) статистически значимо снижались по сравнению с исходными значениями лишь при выполнении паттерна дыхания с ЧД=1/мин (что позволяет говорить о периодической гипоксемии со снижением значений SpO₂ однократно в течение каждого дыхательного цикла при ЧД=1/мин).

Аналогичные результаты получены и в части PetCO₂ — значения, близкие к гиперкапнии ($44,05 \pm 3,05$ мм рт. ст. при верхней границе нормы 45 мм рт. ст.) регистрировались лишь при ЧД=1/мин. Таким образом, можно сделать вывод, что гиперкапническим режимом дыхания из всех исследованных является только выполняемый с ЧД=1/мин.

Принимая за нормакапнию значения 35–45 мм рт. ст. включительно, можно отметить, что при дыхании с ЧД=3/мин у 43,2%

Рисунок 1. Фрагменты протоколов спирографии с функцией газоанализа: а — спирографическая кривая при ЧД 1 раз/мин: восходящая часть кривой — вдох (30 секунд), нисходящая часть кривой — выдох (30 секунд); б — PCO₂ при ЧД 1 раз/мин; регистрируется гиперкапния (PetCO₂ = 46,5 мм рт. ст.); в — FeO₂ (процентное содержание O₂ в выдыхаемом воздухе) при ЧД 1 раз/мин, регистрируется альвеолярная гипоксия (10, 3%)



Таблица 2
Результаты анализа легочной вентиляции
и газообмена при свободном дыхании;
с частотой дыхания 3/мин, 1,5/мин и 1/мин у лиц,
выполнивших все 4 режима (объяснение в тексте) (n = 24)

	Этапы исследования				p post-hoc
	Свободное дыхание (I) (n = 24)	ЧД = 3/мин (II) (n = 24)	ЧД = 1,5/мин (III) (n = 24)	ЧД = 1/мин (IV) (n = 24)	
МОД (л/мин) M ± SD (95% ДИ)	8,36 ± 2,41 (3,63–13,38)	12,94 ± 3,71 (4,5–19,54)	6,29 ± 1,7 (2,5–9,4)	4,22 ± 0,92 (2,35–6,09)	< 0,001 ¹ p _{I-II} < 0,001 [*] p _{I-III} = 0,001 [*] p _{I-IV} < 0,001 [*] p _{II-III} < 0,001 [*] p _{II-IV} < 0,001 [*] p _{III-IV} < 0,001 [*]
МОД / ЖЕЛ M ± SD (95% ДИ)	1,61 ± 0,53 (0,67–2,8)	2,42 ± 0,47 (1,43–3,35)	1,18 ± 0,2 (0,78–1,58)	0,8 ± 0,13 (0,53–1,07)	< 0,001 [*] p _{I-II} < 0,001 [*] p _{I-III} = 0,001 [*] p _{I-IV} < 0,001 [*] p _{II-III} < 0,001 [*] p _{II-IV} < 0,001 [*] p _{III-IV} < 0,001 [*]
ΔО (л) M ± SD (95% ДИ)	0,77 ± 0,17 (0,45–1,13)	4,19 ± 1,21 (1,48–6,39)	4,23 ± 1,11 (1,69–6,2)	4,05 ± 0,91 (2,2–5,9)	< 0,001 [*] p _{I-II} < 0,001 [*] p _{I-III} < 0,001 [*] p _{I-IV} < 0,001 [*] p _{II-III} = 1,000 p _{II-IV} = 1,000 p _{III-IV} = 1,000
ΔО / ЖЕЛ M ± SD (95% ДИ)	0,15 ± 0,05 (0,07–0,26)	0,79 ± 0,18 (0,43–1,14)	0,79 ± 0,13 (0,52–1,04)	0,76 ± 0,13 (0,51–1,02)	< 0,001 [*] p _{I-II} < 0,001 [*] p _{I-III} < 0,001 [*] p _{I-IV} < 0,001 [*] p _{II-III} = 1,000 p _{II-IV} = 1,000 p _{III-IV} = 1,000
PetCO ₂ макс. (мм рт. ст.) M ± SD (95% ДИ)	36,23 ± 4,40 (28,06–45,9)	32,58 ± 2,99 (27,93–40,05)	39,35 ± 3,22 (37,99–40,70)	44,05 ± 3,05 (37,87–50,22)	< 0,001 [*] p _{I-II} = 0,003 [*] p _{I-III} = 0,007 [*] p _{I-IV} < 0,001 [*] p _{II-III} < 0,001 [*] p _{II-IV} < 0,001 [*] p _{III-IV} < 0,001 [*]
FeO ₂ средний (%) Me (Q1–Q3)	13,95 (13,35–14,72)	15,55 (15,20–16,30)	13,10 (11,48–14,10)	10,70 (10,17–11,32)	< 0,001 [*] p _{I-II} = 0,002 [*] p _{I-III} = 0,320 p _{I-IV} < 0,001 [*] p _{II-III} < 0,001 [*] p _{II-IV} < 0,001 [*] p _{III-IV} = 0,001 [*]
SpO ₂ средний (%) M ± SD (95% ДИ)	96,74 ± 1,25 (94,32–99,36)	97,35 ± 0,80 (95,69–98,92)	96,98 ± 1,35 (93,99–99,46)	95,85 ± 1,44 (92,93–98,78)	0,001 [*] p _{I-II} = 0,144 p _{I-III} = 0,534 p _{I-IV} = 0,109 p _{II-III} = 0,487 p _{II-IV} < 0,001 [*] p _{III-IV} = 0,039 [*]
SpO ₂ миним. (%) Me (Q1–Q3)	95,00 (93,75–96,00)	95,43 (95,00–96,00)	95,00 (93,59–96,00)	92,00 (90,75–94,00)	< 0,001 [*] p _{I-II} = 0,409 p _{I-III} = 0,196 p _{I-IV} < 0,001 [*] p _{II-III} = 0,036 p _{II-IV} < 0,001 [*] p _{III-IV} = 0,004 [*]

¹ Различия показателей статистически значимы (p < 0,05).

(19 из 44) участников гипокпапния не наблюдалась: PetCO₂ было равно или более 35,0 мм рт. ст. При ЧД=1/мин гиперкапния не была достигнута у 70,1% (17 из 24) участников: PetCO₂ было равно или менее 45,0 мм рт. ст. Ряд случаев трактовался как нормокапния, хотя от пограничных значений отличался лишь десятичным знаком (44,9 мм рт.ст.). Индивидуальные различия PetCO₂ при одной ЧД можно объяснить разным ДО и МОД, а также, возможно, индивидуальными особенностями газового метаболизма. При этом во время выполнения дыхательных упражнений у всех участников относительно режима «свободное дыхание» наблюдались сдвиги PetCO₂, соответствующие уменьшению и или увеличению МОД. Нами предполагается выполнить внутrigрупповой анализ в последующих работах (на большем количестве участников).

Упражнения с поддержанием произвольной гиповентиляции (при условии, что гиповентиляция сопровождается снижением содержания O₂ и увеличением уровня CO₂ в выдыхаемом газе) можно рассматривать как вариант гипоксически-гиперкапнического тренинга, потенциально способного оказывать положительный эффект на толерантность головного мозга к ишемии [14, 15] и факторы нейропротекции [16, 17, 18]. Ряд исследователей сообщает, что в нормальных физиологических условиях между содержанием CO₂ в организме и уровнем мозгового кровотока имеется практически линейная зависимость: повышению PaCO₂ на 1 мм рт. ст. соответствует прирост мозгового кровотока на 1,1–1,3 мл/100 г/мин. Снижение PaCO₂ до 20–25 мм рт. ст. снижает церебральное кровообращение на 40–50%, дальнейшее снижение PaCO₂ уже не приводит к снижению ЦК [19]. В исследованиях с использованием транскраниальной доплерографии показаны разнонаправленные изменения мозгового кровотока: при гипервентиляционных техниках с частым глубоким дыханием наблюдалось снижение конечно-диастолической скорости (end-diastolic velocity, EDV) и средней скорости потока (mean flow velocities, MFV); при задержке дыхания имели место противоположные изменения; авторы связывают это с изменениями газообмена — гипокпапнией при гипервентиляции и гиперкапнией при задержке дыхания и влиянием PaCO₂ на мозговое кровообращение [20].

Максимальный дыхательный объем и ЖЕЛ

Все участники исследования получали инструкции выполнять дыхательные упражнения (с продолжительностью вдоха 10, 20, 30 и более секунд), используя максимально доступный дыхательный объем (то есть по возможности близкий или равный ЖЕЛ). По субъективным ощущениям участников, так и было (в соответствии с рекомендациями участники выполняли максимально глубокие вдох и выдох). Однако при выполнении упражнений ДО всегда был меньше ЖЕЛ; отношение ДО/ЖЕЛ при разных частотах дыхания составляло от 0,74 до 0,83. То есть, несмотря на установку дышать максимально глубоко, опытные волонтеры при удлинении дыхательного цикла оказались не в состоянии вдохнуть объем, равный ЖЕЛ (что подтвердилось на всей выборке). Можно предполагать, что причиной тому являются физиологические механизмы регуляции нормального дыхания, в частности, рефлекс Геринга–Брейера, дуга которого начинается от рецепторов растяжения легочной паренхимы; рецепторы реагируют на степень растяжения легочной ткани, афферентные волокна от рецепторов растяжения легочной ткани идут в составе блуждающего нерва. При перерезке этого нерва дыхание становится более медленным и глубоким. При интактном блуждающем нерве импульсация от рецепторов растяжения поступает в продолговатый мозг и обрабатывается нейронами дыхательного центра, благодаря чему активность дыхательной мускулатуры модифицируется в соответствии со степенью растяжения легких. Физиологическое значение рефлекса Геринга–Брейера состоит в ограничении дыхательных экскурсий; в экстремальных условиях данный рефлекс препятствует перерастяжению легких [21]. По-видимому, в данном случае при экстремально удлинённом вдохе и существенном растяжении легких активизация рефлекторных механизмов регуляции создает субъективное ощущение максимального вдоха и не позволяет задействовать ДО, равный ЖЕЛ.

Коэффициент вентиляции

ЖЕЛ является физиологически детерминированной индивидуальной величиной, зависящей также от этнической принадлежности, уровня тренированности и физического развития, состояния здоровья индивидуума [22]. Рост, пол и возраст индивидуума определяют наиболее популяционно вероятные — так называемые должные величины ЖЕЛ.

В рамках данной работы нами впервые использован способ расчета, который является отношением МОД к ЖЕЛ и который мы назвали «коэффициентом вентиляции».

$$\text{Квент} = \text{МОД}/\text{ЖЕЛ}$$

МОД, изменяемый в процессе выполнения дыхательных упражнений, может меняться в зависимости от ЧД и от индивидуальной ЖЕЛ (а значит, доступного максимального ДО), сдвигаясь в сторону гипер- или гиповентиляции либо оставаясь в зоне нормальной вентиляции. Таким образом, МОД, достигнутый в результате выполнения упражнения и выраженный в единицах ЖЕЛ, позволяет оценивать сдвиг вентиляции легких и газообмена для каждого конкретного случая. Опираясь на полученные нами экспериментальные данные соотношения МОД/ЖЕЛ (таблица 2), можно предварительно сформулировать для Квент следующие приблизительные «зоны значений» (табл. 3).

При достижении значений Квент, меньших 1, дыхательное упражнение становится гиповентиляционным. Для уточнения зон

Таблица 3
Зоны значений коэффициента вентиляции

	Гиперкапния	Нормокапния	Гипокапния
Квент	менее 1	1–2	более 2

значений коэффициента вентиляции потребуются дальнейшие исследования на большей выборке участников.

Выводы

1. Для проведения подобных исследований необходим спирогазоанализатор, отличающийся от стандартных более высокой чувствительностью по потоку и долговременной стабильностью, нечувствительностью к 100% влажности выдыхаемого воздуха, существенно меньшим воздушным сопротивлением дыханию, а также специализированным программным обеспечением, позволяющим одновременно регистрировать спирограмму, капнограмму, оксиграмму и фотоплетизмограмму.
2. Дыхательные упражнения йоги с ЧД 1/минуту могут выступать в качестве методики доступного гипоксически-гиперкапнического тренинга, не требуя специального оборудования. Данное исследование проводилось на здоровых волонтерах, поэтому клиническое применение методики (для пациентов с той или иной патологией) требует дальнейшего изучения. При дыхательном режиме с ЧД=1,5/мин происходит статистически значимое снижение МОД по сравнению с покоем, а также увеличение PetCO_2 и снижение FeO_2 — хотя данные показатели газообмена и остаются в рамках нормальных значений. Дыхание с ЧД=3/мин с максимально доступным ДО приводит к увеличению МОД и гипокапнии, то есть является гипервентиляционным.
3. При существенном удлинении вдоха (10, 20, 30 и более секунд) ДО всегда меньше ЖЕЛ, несмотря на установку максимально глубокого дыхания; отношение ДО/ЖЕЛ составляет 0,74–0,83 — что может быть обусловлено такими физиологическими механизмами регуляции, как рефлекс Геринга–Брейера.

Список литературы / References:

1. Muralikrishnan K., Balakrishnan B., Balasubramanian K., Visnegarawla F. Measurement of the effect of Isha Yoga on cardiac autonomic nervous system using short-term heart rate variability. *Journal of Ayurveda & Integrative Medicine*. 2012. April-June. Vol 3. Issue 2.
2. Nivethitha L., Moovenantha A., Manjunath N. K. Effects of Various Prāṇāyāma on Cardiovascular and Autonomic Variables. *Anc Sci Life*. 2016. Oct — Dec. 36(2): 72–77. DOI: 10.4103/asl.ASL_178_16.
3. Dinesh T., Gaur G. S., Sharma V. K., Madanmohan T., Harichandra Kumar K. T., Bhavanani A. B. Comparative effect of 12 weeks of slow and fast pranayama training on pulmonary function in young, healthy volunteers: A randomized controlled trial. *Int J Yoga*. 2015. Jan. 8(1): 22–26. DOI: 10.4103/0973-6131.146051
4. Brown R. P., Gerbarg P. L. Yoga breathing, meditation, and longevity. *Ann N Y Acad Sci*. 2009. 1172: 54–62.
5. Rocha K. K., Ribeiro A. M., Rocha K. C., Sousa M. B., Albuquerque F. S., Ribeiro S., et al. Improvement in physiological and psychological parameters after 6 months of yoga practice. *Conscious Cogn*. 2012. 21: 843–850.
6. Sharma V. K., Rajajeyakumar M., Velkumary S., Subramanian S. K., Bhavanani A. B., Madanmohan A. S., et al. Effect of fast and slow pranayama practice on cognitive functions in healthy volunteers. *J Clin Diagn Res*. 2014. 8: 10–13.

7. Novaes M. M., Palhano-Fontes F., Onias H., Andrade K. C., Lobão-Soares B., Arruda-Sanchez T., et al. Effects of yoga respiratory practice (Bhastrika pranayama) on anxiety, affect, and brain functional connectivity and activity: A randomized controlled trial. *Front Psychiatry*. 2020. 11: 467.
8. Thanalakshmi J., Maheshkumar K., Kannan R., Sundareswaran L., Venugopal V., Poonguzhali S. Effect of Sheetal pranayama on cardiac autonomic function among patients with primary hypertension: A randomized controlled trial. *Complement Ther Clin Pract*. 2020. 39: 101138.
9. Miyamura M., Nishimura K., Ishida K., Katayama K., Shimaoka M., Hiruta S. Is man able to breathe once a minute for an hour? The Effect of Yoga Respiration on Blood Gases. *Japanese Journal of Physiology*. 2002. 52: 313–316. URL: <https://doi.org/10.2170/jjphysiol.52.313>.
10. McKay J. A. A., McCulloch C. L., Querido J. S., Foster G. E., Koehle M. S., Sheel A. W. The effect of consistent practice of yogic breathing exercises on the human cardiorespiratory system. *Respiratory Physiology & Neurobiology*. 2016. 233: 41–51. DOI: 10.1016/j.resp.2016.07.005.
11. Miller M. R., Hankinson J., Brusasco V., et al. ATS/ERS Task Force. Standardisation of spirometry. *Eur. Respir. J.* 2005. Vol. 26: 319–338. DOI: 10.1183/09031936.05.
12. Graham B. L., Steenbruggen L., Miller M. R. et al. Standardization of Spirometry 2019 Update. An Official American Thoracic Society and European Respiratory Society Technical Statement. *Am. J. Respir. Crit. Care. Med.* 2019. Vol. 200. 4. e70–e88. DOI: 10.1164/rccm.201908–1590ST.
13. Стручков П. В., Борисова О. Е., Цека О. С., Потемкин А. В., Цека Е. О., Маничев И. А., Щербитский В. Г. Применение капнометрии в пульмонологической практике. *Практическая пульмонология*. 2016. 3: 62–64.
Struchkov P. V., Borisova O. E., Tseka O. S., Potemkin A. V., Tseka E. O., Manichev I. A., Scherbitsky V. G. The Use of Capnometry in Pulmonology *Practical pulmonology*. 2016. 3: 62–64.
14. Rybnikova E., Gluschenko T., Tulkova E., Churilova A., Jaroshevich O., Baranova K., Samoilov M. Pre-conditioning induces prolonged expression of transcription factor pCREB and NF- κ B in the neocortex of rats before and following severe hypobaric hypoxia. *Journal of Neurochemistry*. 2008. 106(3): 1450–1458. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1471-4159.2008.05516.x>.
15. Zhan L., Wang T., Li W., Xu Z. C., Sun W., Xu E. Activation of Akt/FoxO signaling pathway contributes to induction of neuroprotection against transient global cerebral ischemia by hypoxic pre-conditioning in adult rats. *Journal of Neurochemistry*. 2010. 114(3): 897–908. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1471-4159.2010.06816.x>.
16. Tao T., Liu Y., Zhang J., Xu Y., Li W., Zhao M. Therapeutic hypercapnia improves functional recovery and attenuates injury via antiapoptotic mechanisms in a rat focal cerebral ischemia/reperfusion model. *Brain Research*. 2013. (1533): 52–62. URL: <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2013.08.014>.
17. Tregub P., Kulikov V., Bessalov A. Tolerance to acute hypoxia maximally increases in case of joint effect of normobaric hypoxia and permissive hypercapnia in rats. *Pathophysiology*. 2013. 20(3): 165–170. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pathophys.2013.09.001>.
18. Tregub P., Kulikov V., Motin Y., Bessalov A., Osipov I. Combined exposure to hypercapnia and hypoxia provides its maximum neuroprotective effect during focal ischemic injury in the brain. *Journal of Stroke & Cerebrovascular Diseases*. 2015. 24(2): 381–387. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2014.09.003>.
19. Johnny E. Brian, Jr., M. D. Carbon dioxide and the Cerebral Circulation. *Anesthesiology*. 1998. 88: 1365–1386.
20. Nivethitha L., Mooventhana 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
21. Физиология человека / под ред. Р. Шмидта и Г. Тевса. М.: Мир, 2007. *Human Physiology / edited by R. Schmidt and G. Tevs. M.: Mir, 2007*
22. Quanjer P. H. et al. Multi-ethnic reference values for spirometry for the 3–95-yr age range: The global lung function 2012 equations. *Eur. Resp. J.* 2012. Vol. 40. 6: 1324–1343.
23. Reivich M. Arterial PCO₂ and cerebral hemodynamics. *Am J Physiol*. 1964. 206: 25–35.
24. Corfield D. R., Murphy K., Josephs O., Adams L., Turner R. Does hypercapnia-induced cerebral vasodilation modulate the hemodynamic response to neural activation? *Neuroimage*. 2001. 13: 1207–1211.
25. Стручков П. В., Борисова О. Е., Иванушкина А. В., Цека О. С., Потемкин А. В., Цека Е. О., Маничев И. А., Щербитский В. Г. О значении капнометрического исследования при обследовании курящих лиц и больных с начальными проявлениями хронической обструктивной болезни легких. *Пульмонология*. 2015. 25(2): 167–174. <https://doi.org/10.18093/0869-0189-2015-25-2-167-174>.
Struchkov P. V., Borisova O. E., Ivanushkina A. V., Tseka O. S., Potemkin A. V., Tseka E. O., Manichev I. A., Shcherbitsky V. G. An importance of capnography in smokers and in patients with early stage chronic obstructive pulmonary disease. *PULMONOLOGIYA*. 2015;25(2):167–174. (In Russ.) <https://doi.org/10.18093/0869-0189-2015-25-2-167-174>
26. Уэст Дж. Физиология дыхания. Основы. М: Мир, 1988. *West J. Respiratory Physiology: The Essentials M: Mir, 1988.*

Сведения об авторах:

Фролов Артем Владимирович — врач функциональной диагностики¹. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8774-6996>

Маничев Игорь Александрович — кандидат физ.-мат. наук, научный сотрудник, зам. директора². ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4446-3731>

Ермолаева Саргылана Александровна — аналитик медицинских данных, методист по адаптивной физкультуре¹. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-4754-9255>

¹ ООО «Санкт-Петербургский институт восточных методов реабилитации»

² ООО «Белинтелмед»

Автор для переписки: Фролов А. В., e-mail: polyclinic@list.ru

About authors

Frolov A. V. — functional diagnostics doctor¹. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8774-6996>

Manichev I. A. — PhD in P&M, Researcher, Deputy Director of Belintelmed LLC². ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4446-3731>

Ermolaeva S. A. — medical data analyst². ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4754-9255>

¹ St. Petersburg Institute of Oriental Rehabilitation Methods

² Belintelmed LLC

Corresponding author: Frolov A. V., e-mail: polyclinic@list.ru

Статья поступила / Received 23.02.2024

Получена после рецензирования / Revised 24.02.2024

Принята в печать / Accepted 25.02.2024

Для цитирования: Фролов А. В., Маничев И. А., Ермолаева С. А. Исследование газообмена при разных режимах вентиляции в дыхательных упражнениях йоги. *Медицинский алфавит*. 2024;(6):28–34. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2024-6-39-46>

For citation: Frolov A. V., Manichev I. A., Ermolaeva S. A. Study of gas exchange under different modes of ventilation in yoga breathing exercises. *Medical alphabet*. 2024;(6):28–34. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2024-6-39-46>

