



Гиповентиляционные упражнения йоги: влияние на газообмен

Фролов А.В.¹, Ермолаева С.А.¹, Маничев И.А.²

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

²ООО «Белинтелмед», Минск, Республика Беларусь

Резюме

Цель. Оценка изменений газообмена и параметров внешнего дыхания при выполнении гиповентиляционных упражнений йоги.

Материал и методы. 22 опытных волонтера (18 мужчин и 4 женщины, средний возраст $42,95 \pm 8,14$ года) выполняли дыхательные упражнения йоги с частотой 3 раза в минуту, 1,5 раза в минуту, 1 раз в минуту, а также свободное дыхание в течение 2 минут. Проводилась регистрация частоты дыхания (ЧД), минутного объема дыхания (МОД), дыхательного объема (ДО), парциального давления CO_2 в выдыхаемом воздухе в конце выдоха ($PetCO_2$), процентного содержания O_2 в выдыхаемом воздухе (FeO_2) и сатурации гемоглобина (SpO_2).

Результаты и обсуждение. Режим дыхания с ЧД = 3 раза/мин является гипervентиляционным, сопровождаясь статистически значимым увеличением МОД и снижением $PetCO_2$; показатели сатурации гемоглобина при этом не меняются. Дыхание с частотой 1,5 раза/мин сопровождается статистически значимым снижением МОД по сравнению с покоем, а также увеличением $PetCO_2$ и снижением FeO_2 , то есть является гиповентиляционным, хотя внутри этой подгруппы имеется определенная гетерогенность в зависимости от рекрутированного дыхательного объема. Показатели сатурации гемоглобина при данном режиме дыхания не меняются. Режим дыхания с ЧД = 1 раз/мин сопровождается статистически значимым снижением МОД, увеличением $PetCO_2$ и снижением FeO_2 ; средние показатели сатурации гемоглобина не меняются, но минимальные значения сатурации (наблюдаемые однократно в течение каждого дыхательного цикла) статистически значимо ниже по сравнению с состоянием покоя. Полученные результаты позволяют предполагать, что гиповентиляционные упражнения йоги могут оказывать положительное влияние на мозговой кровоток и цереброваскулярную реактивность.

Заключение. Выполнение дыхательных упражнений йоги при частоте дыхания 1,5 и 1 раз в минуту сопровождается статистически значимой гиповентиляцией, альвеолярной гиперкапнией и гипоксией.

Ключевые слова: дыхательные упражнения, йога, гиперкапния, гипоксия, профилактика, спирометрия, пульсоксиметрия, сатурация, газоанализ

Источник финансирования: Авторы заявляют об отсутствии финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Фролов А.В., Ермолаева С.А., Маничев И.А. Гиповентиляционные упражнения йоги: влияние на газообмен. *Вестник восстановительной медицины*. 2021; 20 (5): 73-80. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2021-20-5-73-80>

Для корреспонденции: Фролов Артем Владимирович, e-mail: polyclinic@list.ru

Статья получена: 06.07.2021

Статья принята к печати: 10.10.2021

Hypoventilation Yoga Exercises: Effects on Respiratory Metabolism

Artem V. Frolov¹, Sargylana A. Ermolaeva¹, Igor A. Manichev²

¹Saint-Petersburg Institute of Oriental Rehabilitation Methods, Saint-Petersburg, Russian Federation

²Belintelmed LLC, Minsk, Republic of Belarus

Abstract

Aim. Assessment of changes in respiratory metabolism and parameters of external respiration during hypoventilation yoga exercises.

Material and methods. 22 experienced volunteers (18 men and 4 women, mean age 42.95 ± 8.14 years) performed yoga breathing exercises with a frequency of 3 times per minute, 1.5 times per minute, 1 time per minute, as well as free breathing for 2 minutes. Respiratory rate (RR), minute ventilation (MV), tidal volume (TV), partial pressure of CO_2 in expired air at the end of exhalation ($PetCO_2$), percentage of O_2 in expired air (FeO_2) and hemoglobin saturation (SpO_2) were recorded.

Results and discussion. The breathing regimen with RR = 3 times / min is hyperventilating, accompanied by a statistically significant increase in respiratory minute volume (RMV) and a decrease in $PetCO_2$; hemoglobin saturation indices are not changed. Breathing with a frequency of 1.5 times / min is accompanied by a statistically significant decrease in RMV compared to the rest state, as well as an increase in $PetCO_2$ and a decrease in FeO_2 , that is, it is hypoventilating, although there is a certain heterogeneity within this subgroup depending on the recruited tidal volume. Indicators of hemoglobin saturation with a given breathing mode do not change. The breathing regimen with RR = 1 time / min is accompanied by a statistically significant decrease in the RMV, an increase in $PetCO_2$ and

a decrease in FeO₂; the average values of hemoglobin saturation do not change, but the minimum saturation values (observed once during each respiratory cycle) are statistically significantly lower than at the rest state. These results suggest that hypoventilating yoga exercises may have a positive effect on cerebral blood flow and cerebrovascular reactivity.

Conclusion. Performing yoga breathing exercises at the respiration rate of 1.5 and 1 times per minute is accompanied by statistically significant hypoventilation, alveolar hypercapnia and hypoxia.

Keywords: breathing exercises, yoga, hypercapnia, hypoxia, prevention, spirometry, pulse oximetry, saturation, gas analysis

Acknowledgments: The study had no sponsorship.

Conflict of interest: The authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Artem V. Frolov, Sargylana A. Ermolaeva, Igor A. Manichev Hypoventilation Yoga Exercises: Effects on Respiratory Metabolism.

Bulletin of Rehabilitation Medicine. 2021; 20 (5): 73-80. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2021-20-5-73-80>

For correspondence: Artem V. Frolov, e-mail: polyclinic@list.ru

Received: Jul 06, 2021

Accepted: Oct 10, 2021

В йоге используется широкий спектр дыхательных упражнений, развивающих навыки сознательного управления аппаратом внешнего дыхания. Для этого применяется развитие суставной подвижности скелета грудной клетки, произвольное управление отдельными группами экспираторных и инспираторных дыхательных мышц, техники, нацеленные на увеличение подвижности и силы диафрагмы. Осваивается произвольный контроль мышц голосовой щели, что позволяет, создавая сопротивление экспираторно-инспираторному потоку воздуха, регулировать продолжительность вдоха и выдоха. Данные навыки позволяют задействовать максимально возможную жизненную ёмкость легких (ЖЕЛ), а также увеличивать продолжительность дыхательного цикла, снижая частоту дыхания (ЧД) и в итоге, добиваясь снижения минутного объёма дыхания (МОД) при максимальном дыхательном объёме (ДО).

По мере освоения упражнений развивается способность произвольно поддерживать гиповентиляционный режим дыхания в течение существенных промежутков времени (20, 30 минут и более). Произвольная гиповентиляция, сопровождаемая гипоксией и гиперкапнией, может рассматриваться как вариант гипоксической и гиперкапнической тренировки, потенциально способной улучшать процессы митохондриального окисления, стимулировать процессы микроциркуляции, оптимизируя трофические и метаболические процессы. Имеется целый ряд научных работ, демонстрирующих эффективность дозированных гипоксических воздействий для повышения толерантности головного мозга к ишемии [1, 2]. Гиперкапния также обладает нейропротекторным эффектом в условиях нормоксии [3]. При сочетанном воздействии гипоксии и гиперкапнии значительно увеличивается ишемическая толерантность головного мозга, более значимо по сравнению с их изолированным применением [4, 5]. И гипоксия, и гиперкапния ингибируют апоптоз в околоинсультной зоне, стимулируют митохондриальные АТФ-зависимые калиевые каналы, вызывают накопление транскрипционного фактора HIF-1α и стимулируют эритропоэз. Сочетанное воздействие гипоксии и гиперкапнии оказывает максимальное влияние на большинство нейропротекторных механизмов, а их изолированное воздействие в ряде случаев взаимно потенцирует эффекты друг друга [6].

У пациентов с хронической ишемией головного мозга в результате применения дыхательной гимнастики наблюдается уменьшение статико-координаторных и психоэмоциональных нарушений, головокружений и цефалгий, утомляемости, повышение толерантности к физической нагрузке, общей физической выносливости,

улучшение показателей углеводного обмена и липидов крови [7, 8].

В нормальных физиологических условиях между содержанием углекислого газа в организме и уровнем мозгового кровотока имеется практически линейная зависимость: мозговой кровоток увеличивается на 4–6% с увеличением PaCO₂ (парциальное давление CO₂ в артериальной крови) на каждый миллиметр рт. ст. [9]. Увеличение PaCO₂ до 80 мм рт. ст. и более инициирует максимальное повышение церебрального кровотока на 100–200% у анестезированных животных [10]. CO₂ как вазоактивный агент, способный влиять на тонус артерий и церебральный кровоток, используется во многих исследованиях. Для увеличения PaCO₂ применяются ингаляции газовых смесей с повышенным содержанием CO₂, а также задержка дыхания [11].

Дыхательные упражнения йоги, сопровождающиеся гиповентиляцией, а также альвеолярной и артериальной гиперкапнией, могут, во-первых, рассматриваться как новые функциональные тесты (например, для исследований цереброваскулярной реактивности), не требующие дополнительного оборудования для создания газовых дыхательных смесей. Во-вторых, подобная система упражнений может рассматриваться как методика гиперкапнической и гипоксической тренировки с целью стимуляции и улучшения мозгового кровотока (также не требующая оборудования и дыхательных тренажеров для ее проведения). Дозированная гипоксически-гиперкапническая тренировка сопровождается увеличением церебрального сосудистого сопротивления, снижением реактивности мозговых сосудов к гиперкапнии, увеличением коллатерального резерва и скорости ауторегуляции церебрального кровообращения – данные изменения являются важными компонентами повышения толерантности мозга к ишемии [12].

Количество работ, посвящённых гиповентиляционным техникам йоги, в которых бы подробно оценивались параметры газообмена у практикующих, весьма ограничено. Miyamura и соавторы описали эксперимент на одном участнике, который выполнял дыхание с частотой 1 раз/мин. в течение одного часа; помимо газоанализа выдыхаемого воздуха и определения PetCO₂ и PetO₂ (парциального давления CO₂ и O₂ в выдыхаемом воздухе в конце выдоха) исследовалось содержание газов крови путем катетеризации лучевой артерии и многократного забора образцов крови по время выполнения дыхательного упражнения. В данном эксперименте на одном опытном участнике было продемонстрировано достижение альвеолярной и артериальной гиперкапнии и гипоксии, респираторного ацидоза, а также снижение

гиперкапнической хемочувствительности [13]. Другое исследование с участием трёх волонтеров, выполнявших замедленное дыхание с частотой $1,4 \pm 0,2$ раза/мин., показало снижение $PetCO_2$ и увеличение $PetCO_2$ (изменения не были статистически значимы) [14].

В целом, на текущем этапе имеется дефицит научных исследований, посвящённых произвольной гиповентиляции и связанным с ней изменениями газообмена, которые были бы проведены на достаточном количестве участников и с удовлетворительным дизайном.

Кроме того, недостаточно изученным остаётся вопрос о том, при каких параметрах произвольного дыхания (таких как ЧД, ДО и МОД) люди с разными антропометрическими данными (рост, жизненная ёмкость лёгких) могут развивать режим произвольной гиповентиляции, достигая состояния гипоксии и гиперкапнии.

Цель. Оценка изменений газообмена и параметров внешнего дыхания при выполнении гиповентиляционных упражнений йоги.

Материал и методы

В исследовании приняли участие 22 человека (18 мужчин и 4 женщины), регулярно практикующие дыхательные техники йоги с произвольным снижением частоты дыхания. Средний возраст участников составил $42,95 \pm 8,14$ года. У каждого участника были определены рост, вес, а также жизненная ёмкость лёгких (ЖЕЛ) – абсолютные (л) и должные (% по системе нормативов Клементя) значения.

В течение 2 минут в состоянии покоя и после 15-минутного отдыха проводилась регистрация свободного дыхания с определением частоты дыхания (ЧД), минутного объёма дыхания (МОД), дыхательного объёма (ДО), парциального давления CO_2 в выдыхаемом воздухе в конце выдоха ($PetCO_2$), процентного содержания O_2 в выдыхаемом воздухе (FeO_2) и сатурации гемоглобина (SpO_2) спирометром MAC-2C с функцией газоанализа и пульсоксиметрии (производство компании «Белинтелмед», г. Минск).

Далее каждый испытуемый в положении «сидя» на стуле с прямой спиной выполнял доступный ему дыхательный протокол в «спецрежиме» (минимальные значения ЧД с максимальным ДО, вдох и выдох по длительности равны друг другу) в течение 5–6 дыхательных циклов, контролируя длительность вдоха и выдоха с помощью метронома. Носовое дыхание перекрывалось с помощью зажима, дыхание производилось через рот в трубку прибора с использованием сертифицированного одноразового противовирусного фильтра «Vitalograph». При этом проводилась оценка $PetCO_2$ и FeO_2 , регистрация ЧД, ДО, МОД и SpO_2 .

13 участникам был доступен режим с ЧД 1 раз/мин. (вдох и выдох по 30 сек.), для 9 участников минимальная доступная ЧД составила 1,5 раза/мин. (вдох и выдох по 20 сек.). Кроме того, все участники выполняли режим «свободное дыхание» в течение 2 минут, а также режим с ЧД 3 раза/мин. (вдох и выдох по 10 сек.).

Таким образом, всеми участниками выполнялись режимы:

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

13 участников также выполнили режим ЧД 1 раз/мин. (вдох и выдох по 30 сек.). Показатель $PetCO_2$ отображает содержание CO_2 в альвеолярном воздухе в самом конце выдоха; принято считать, что альвеолярный CO_2 равен

содержанию CO_2 в артериальной крови. Норма $PetCO_2 = 35–45$ мм рт. ст. Значения $PetCO_2$ менее 35 соответствуют альвеолярной и артериальной гипоксии, а значения более 45 – гиперкапнии [15].

Количественные показатели оценивались на предмет соответствия нормальному распределению с помощью критерия Шапиро – Уилка. Количественные показатели, имеющие нормальное распределение, описывались с помощью средних арифметических величин и стандартных отклонений ($M \pm SD$), границ 95%-ного доверительного интервала (95% ДИ). В случае отсутствия нормального распределения количественные данные описывались с помощью медианы и нижнего и верхнего квартилей ($Me [Q1; Q3]$). При сравнении количественных показателей, распределение которых отличалось от нормального, в двух связанных группах использовался критерий Уилкоксона. Для сравнения связанных групп по нормальному распределённому количественному признаку применялся однофакторный дисперсионный анализ с повторными измерениями. Статистическая значимость изменений показателя в динамике оценивалась с помощью следа Пиллая (Pillai's Trace). При сравнении зависимых совокупностей, распределение которых отличалось от нормального, использовался непараметрический критерий Фридмана. Статистический анализ проводился с использованием программы «StatTech v. 2.1.0» (разработчик – ООО «Статтех», Россия).

Результаты и обсуждение

Все участники исследования при выполнении дыхательных упражнений в «спецрежиме» – то есть максимально удлиняя вдох и выдох – получали рекомендацию делать максимально возможный по глубине вдох и выдох, задействуя весь доступный дыхательный объём (и по их субъективным ощущениям так и было). Однако при выполнении дыхательного упражнения ДО 4,06 [3,28; 4,50] л оказался статистически значимо меньше, чем ЖЕЛ 5,40 [4,35; 6,01] л ($p < 0,001$). То есть при удлинении вдоха до 20–30 сек. сделать максимально полный вдох (равный по объёму ЖЕЛ) оказалось затруднительно – можно предполагать, что причиной этого является рефлекс Геринга – Брейера (рис. 1).

Обобщённые результаты газоанализа при выполнении дыхательных упражнений в различных дыхательных режимах представлены в таблице 1.

ЧД = 3 раза/мин (вдох и выдох по 10 с), n = 22

По сравнению с дыханием в покое (МОД = 9,21 [7,40; 10,66] л/мин.; ДО = 0,76 [0,68; 0,95] л; $PetCO_2 = 37,25 [35,43; 38,50]$ мм рт. ст.) режим 10:10 приводит к увеличению МОД до 11,39 [10,18; 14,71] л/мин. ($p < 0,001$), увеличению ДО до 3,83 [3,46; 4,93] л ($p < 0,001$) и снижению CO_2 : $PetCO_2 = 32,45 [29,95; 33,98]$ мм рт. ст. ($p < 0,001$), что ниже нормы и говорит о развитии гипервентиляции (табл. 1).

ЧД = 1,5 раза/мин (вдох и выдох по 20 с), n = 22

При дыхании с частотой 1,5 раза/мин группа показала снижение МОД до 6,52 [4,74; 7,31] л/мин ($p < 0,001$), изменение ДО до 4,18 [2,80; 4,78] л ($p < 0,001$) и рост $PetCO_2$ до 40,30 [37,50; 42,85] мм рт. ст. ($p < 0,001$). Данные показатели CO_2 остаются в пределах нормы, однако по сравнению с исходными значениями имеется прирост значений $PetCO_2$, что даёт основания говорить о развитии относительной гиперкапнии.

ЧД = 1 раз/мин (вдох и выдох по 30 с), n = 13

При снижении ЧД до 1 раза/мин продолжалось снижение средних значений МОД до $4,33 \pm 0,60 (3,97–4,70)$ л/мин ($p < 0,001$), увеличение ДО до $4,22 \pm 0,54 (3,90–4,54)$ л ($p < 0,001$) и рост $PetCO_2$ до $44,32 \pm 2,82 (42,62–46,03)$ мм

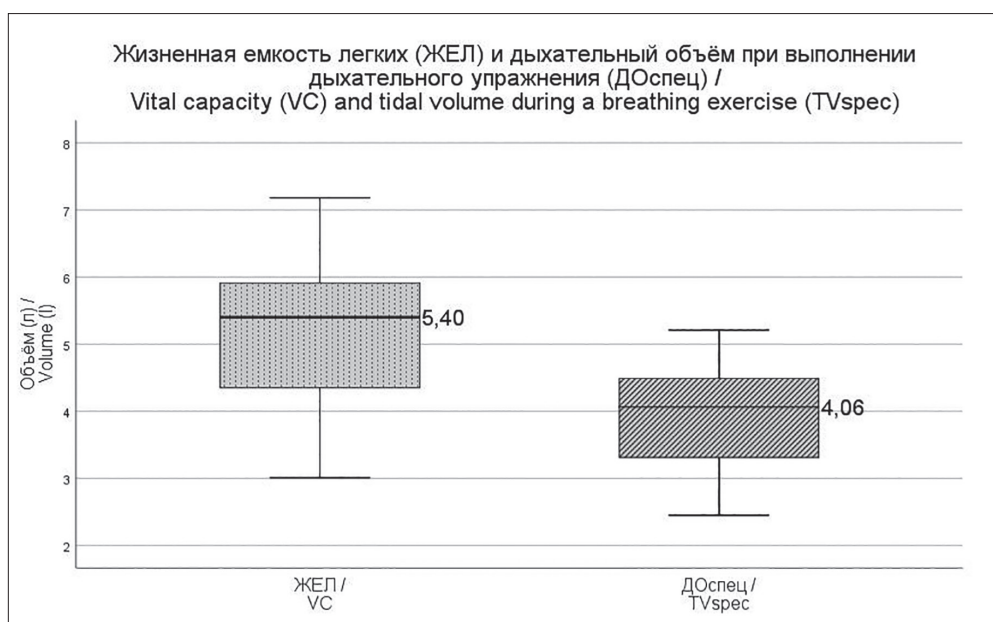


Рис. 1. Жизненная емкость легких (ЖЕЛ) и дыхательный объем при выполнении дыхательного упражнения (ДОспец)
Fig. 1. Vital capacity (VC) and tidal volume during a breathing exercise (TVspec)

Таблица 1. Результаты газоанализа при дыхании в покое, с частотой дыхания 3 раза в минуту и 1,5 раза в минуту (n = 22)
Table 1. Results of gas analysis when breathing at rest, with respiratory frequency 3 times per minute and 1.5 times per minute (n = 22)

Показатель / Indicator	Частота дыхания / Respiratory rate			p
	Дыхание в покое / Free breathing	3 раза/мин. / 3 times/min.	1,5 раза/мин. / 1.5 times/min.	
МОД (л/мин) / MV (l/min)	9,21 [7,40; 10,66]	11,39 [10,18; 14,71]	6,52 [4,74; 7,31]	< 0,001*
ДО (л) / TV (l)	0,76 [0,68; 0,95]	3,83 [3,46; 4,93]	4,18 [2,80; 4,78]	< 0,001*
PetCO ₂ макс (мм рт. ст.) / PetCO ₂ max (mmHg)	37,25 [35,43; 38,50]	32,45 [29,95; 33,98]	40,30 [37,50; 42,85]	< 0,001*
FeO ₂ средний (%) / FeO ₂ average (%)	13,85 [13,47; 14,72]	15,58 [15,20; 16,22]	12,95 [11,25; 14,10]	< 0,001*
SpO ₂ средний (%) / SpO ₂ average (%)	96,86 [96,07; 97,50]	97,08 [96,50; 97,57]	97,11 [96,15; 98,00]	0,080
SpO ₂ мин. (%) / SpO ₂ min. (%)	95,00 [95,00; 96,00]	95,00 [94,72; 96,00]	95,00 [93,75; 96,00]	0,088

Примечание: * – различия показателей статистически значимы (p < 0,05)
Note: * – the difference is statistically significant (p < 0,05)

Таблица 2. Результаты газоанализа при дыхании в покое, с частотой дыхания 3 раза в минуту, 1,5 раза в минуту и 1 раз в минуту (n = 13)
Table 2. Results of gas analysis when breathing at rest, with respiratory frequency 3 times per minute, 1.5 times per minute and 1 time per minute (n = 13)

Показатель / Indicator	Частота дыхания / Respiratory rate				p
	Дыхание в покое / Free breathing	3 раза/мин. / 3 times/min.	1,5 раза/мин. / 1.5 times/min.	1 раз/мин. / 1 time/min.	
МОД (л/мин) / MV (l/min)	9,03 ± 2,21 (7,70–10,37)	13,02 ± 3,08 (11,15–14,88)	6,27 ± 1,60 (5,31–7,24)	4,33 ± 0,60 (3,97–4,70)	< 0,001*
ДО (л) / TV (l)	0,78 ± 0,18 (0,67–0,89)	4,37 ± 0,96 (3,79–4,96)	4,24 ± 1,05 (3,61–4,88)	4,22 ± 0,54 (3,90–4,54)	< 0,001*
PetCO ₂ макс (мм рт. ст.) / PetCO ₂ max (mmHg)	35,58 ± 4,16 (33,07–38,10)	30,98 ± 2,30 (29,59–32,38)	39,03 ± 3,31 (37,03–41,03)	44,32 ± 2,82 (42,62–46,03)	< 0,001*
FeO ₂ средний (%) / FeO ₂ average (%)	14,15 ± 0,91 (13,60–14,69)	15,95 ± 0,56 (15,61–16,28)	13,26 ± 1,34 (12,45–14,07)	10,81 ± 1,01 (10,20–11,42)	< 0,001*
SpO ₂ средний (%) / SpO ₂ average (%)	96,91 ± 1,22 (96,17–97,65)	97,19 ± 0,78 (96,72–97,66)	97,46 ± 1,20 (96,74–98,19)	96,03 ± 1,02 (95,41–96,64)	< 0,001*
SpO ₂ мин. (%) / SpO ₂ min. (%)	95,52 ± 1,49 (94,61–96,42)	94,73 ± 1,48 (93,83–95,62)	95,37 ± 1,67 (94,36–96,38)	93,09 ± 1,93 (91,92–94,26)	< 0,001*

Примечание: * – различия показателей статистически значимы (p < 0,05)
Note: * – the difference is statistically significant (p < 0,05)

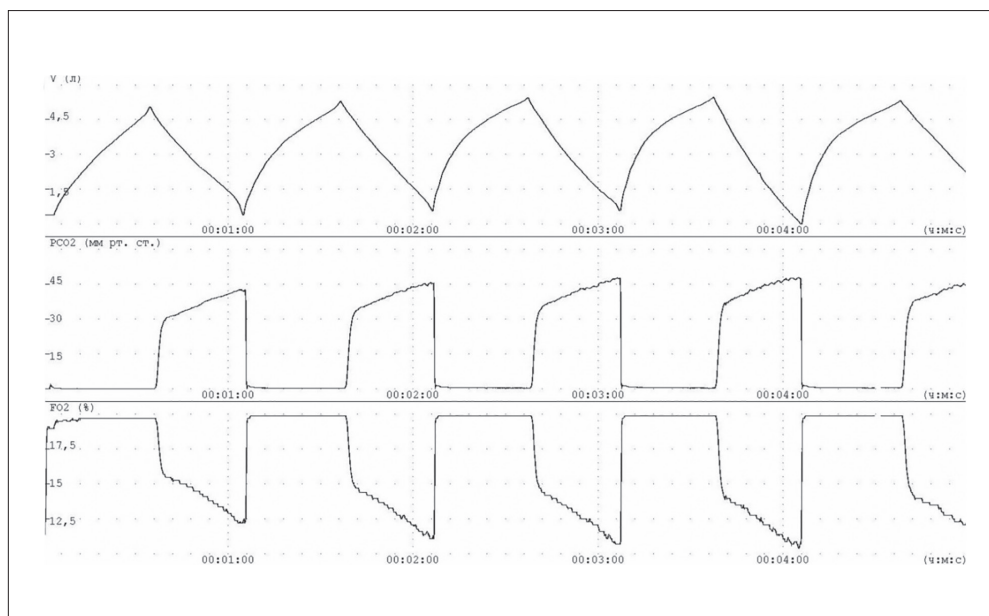


Рис. 1. Фрагмент протокола спирографии с функцией газоанализа. Регистрируется паттерн дыхания с частотой 1 раз/мин; в отчёте – 5-минутный фрагмент. Верхний график – спирографическая кривая: восходящая часть кривой – вдох (30 секунд), нисходящая часть кривой – выдох (30 секунд). Средний график: PCO_2 ; регистрируется $PetCO_2 = 47,5$ мм рт. ст. (при норме 35–45 мм рт. ст.). Нижний график: FeO_2 (процентное содержание O_2 в выдыхаемом воздухе), регистрируется альвеолярная гипоксия

Fig. 1. Fragment of spirometry protocol with gas analysis function. A breathing pattern is recorded with a frequency of 1 time/min; the report contains a 5-minute snippet. The upper graph is the spirometric curve: the ascending part of the curve is inhalation (30 seconds), the descending part of the curve is exhalation (30 seconds). Middle graph: PCO_2 ; recorded $PetCO_2 = 47,5$ mm Hg. Art. (at a rate of 35–45 mm Hg). Bottom graph: FeO_2 (percentage of O_2 in exhaled air), alveolar hypoxia is recorded

рт. ст. ($p < 0,001$), то есть уровень альвеолярного CO_2 достигает верхней границы нормы (табл. 2).

На рисунке 1 дан пример протокола спирографии с графиками, отображающими уровень $PetCO_2$ и FeO_2 .

$ЧД = 0,66–0,8$ раза/мин (вдох и выдох по 40 с и более), $n = 5$

Пятерым участникам исследования было доступен режим с частотой дыхания менее 1 раза/мин ($ЧД = 0,66–0,8$ раза/мин) – и в этом случае наблюдалось снижение среднего МОД до $3,44 \pm 0,46$ (2,87–4,00) л/мин ($p < 0,001$), увеличение ДО до $4,88 \pm 0,28$ (4,53–5,22) л ($p < 0,001$), рост $PetCO_2$ до значений абсолютной гиперкапнии $46,30 \pm 4,01$ (41,32–51,28) мм рт. ст. ($p < 0,001$) и снижение FeO_2 до $9,24 \pm 0,95$ (8,06–10,42)% ($p < 0,01$) (табл. 3).

На рисунке 2 показан пример протокола спирографии с графиками, отображающими уровень $PetCO_2$ и FeO_2 .

Результаты исследования показывают, что лица, имеющие определённый опыт практики дыхательных упражнений йоги, способны произвольно изменять минутный объём дыхания, тем самым, оказывая существенное влияние на показатели газообмена.

Дыхательные упражнения йоги, выполняемые с максимальным дыхательным объёмом и со снижением частоты дыхания, оказывают следующие эффекты на вентиляцию лёгких и газообмен:

1. Режим дыхания с $ЧД = 3$ раза/мин. является гипервентиляционным, сопровождаясь статистически значимым увеличением МОД и снижением $PetCO_2$; показатели сатурации гемоглобина при этом не меняются.

2. Режим дыхания с $ЧД = 1,5$ раза/мин. сопровождается статистически значимым снижением МОД по сравнению с покоем, а также увеличением $PetCO_2$ и снижением FeO_2 , то есть является гиповентиляционным. Это утверждение справедливо для исследуемой группы в целом, но внутри группы имеется определённая гетерогенность в

зависимости от рекрутированного дыхательного объёма. Показатели сатурации гемоглобина при данном режиме дыхания не меняются. Предварительный анализ данных показывает, что в режиме дыхания $ЧД = 1,5$ раза/мин. у одних участников наблюдается гиповентиляция с соответствующими изменениями газообмена, у других вентиляция лёгких остается на нормальном уровне; то же касается и показателей газообмена. Насколько можно судить, эта гетерогенность группы зависит от ЖЕЛ участников и доступного им дыхательного объёма, для уточнения данных закономерностей необходимы последующие исследования.

3. Режим дыхания с $ЧД = 1$ раза/мин. сопровождается статистически значимым снижением МОД, увеличением $PetCO_2$ и снижением FeO_2 ; средние показатели сатурации гемоглобина не меняются, но минимальные значения сатурации (наблюдаемые однократно в течение каждого дыхательного цикла) статистически значимо ниже по сравнению с состоянием покоя.

4. Режимы дыхания со снижением $ЧД$ менее 1 раза/мин. (0,66–0,8 раза/мин.) приводят к абсолютной гиперкапнии ($PetCO_2$ более 45 мм рт. ст.) и гипоксии, достоверно более выраженной по сравнению с вышеперечисленными дыхательными режимами. В этом режиме по сравнению с предыдущими продолжается снижение минимальных значений сатурации гемоглобина при сохранении средних значений на исходном уровне.

Снижение процентного содержания кислорода в выдыхаемом воздухе как признак гипоксии является более чутким методом по сравнению с пульсоксиметрией, которая демонстрирует статистические различия по сравнению с покоем, лишь начиная с $ЧД = 1$ раза/мин. и менее, при этом необходима оценка не средних, а минимальных значений SpO_2 .

Таблица 3. Результаты газоанализа при дыхании в покое, с частотой дыхания 3 раза в минуту, 1,5 раза в минуту, 1 раз в минуту и 0,6–0,88 раз в минуту (n = 5)
Table 3. Results of gas analysis when breathing at rest, with respiratory frequency 3 times per minute, 1,5 times per minute, 1 time per minute and 0.6–0.88 times per minute (n = 5)

Показатель / Indicator	Частота дыхания / Respiratory rate					p
	Дыхание в покое / Free breathing	3 раза/мин. / 3 times/min.	1,5 раза/мин. / 1.5 times/min.	1 раз/мин. / 1 time/min.	0,66–0,88 раза/мин. / 0.66–0.88 time/min	
МОД (л/мин.) / MV (l/min.)	8,88 ± 2,91 (5,27–12,50)	13,67 ± 3,09 (9,83–17,51)	7,12 ± 1,10 (5,76–8,48)	4,39 ± 0,15 (4,20–4,58)	3,44 ± 0,46 (2,87–4,00)	< 0,001*
ДО (л) / TV (l)	0,74 ± 0,11 (0,60–0,88)	4,61 ± 0,96 (3,42–5,80)	4,82 ± 0,71 (3,93–5,70)	4,46 ± 0,17 (4,25–4,67)	4,88 ± 0,28 (4,53–5,22)	< 0,001*
PetCO ₂ макс (мм рт. ст.) / PetCO ₂ max (mmHg)	34,86 ± 5,81 (27,65–42,07)	30,60 ± 1,66 (28,54–2,66)	37,30 ± 2,30 (34,44–40,16)	44,14 ± 3,46 (39,85–8,43)	46,30 ± 4,01 (41,32–51,28)	< 0,001*
FeO ₂ средний (%) / FeO ₂ average (%)	14,22 ± 0,98 (13,00–15,44)	15,98 ± 0,28 (15,64–6,32)	13,84 ± 0,56 (13,14–14,54)	11,24 ± 0,72 (10,35–2,13)	9,24 ± 0,95 (8,06–10,42)	< 0,001*
SpO ₂ средний (%) / SpO ₂ average (%)	97,24 ± 1,19 (95,76–98,72)	97,74 ± 0,59 (97,00–8,47)	97,80 ± 1,32 (96,16–99,44)	96,24 ± 0,74 (95,33–7,16)	97,15 ± 0,72 (96,25–98,05)	0,087
SpO ₂ мин. (%) / SpO ₂ min. (%)	96,40 ± 0,75 (94,32–98,48)	94,94 ± 0,55 (93,41–96,47)	96,20 ± 0,80 (93,98–98,42)	92,82 ± 0,58 (91,19–94,44)	90,25 ± 1,71 (85,49–95,01)	0,008*

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

Note: * – the difference is statistically significant (p < 0,05)

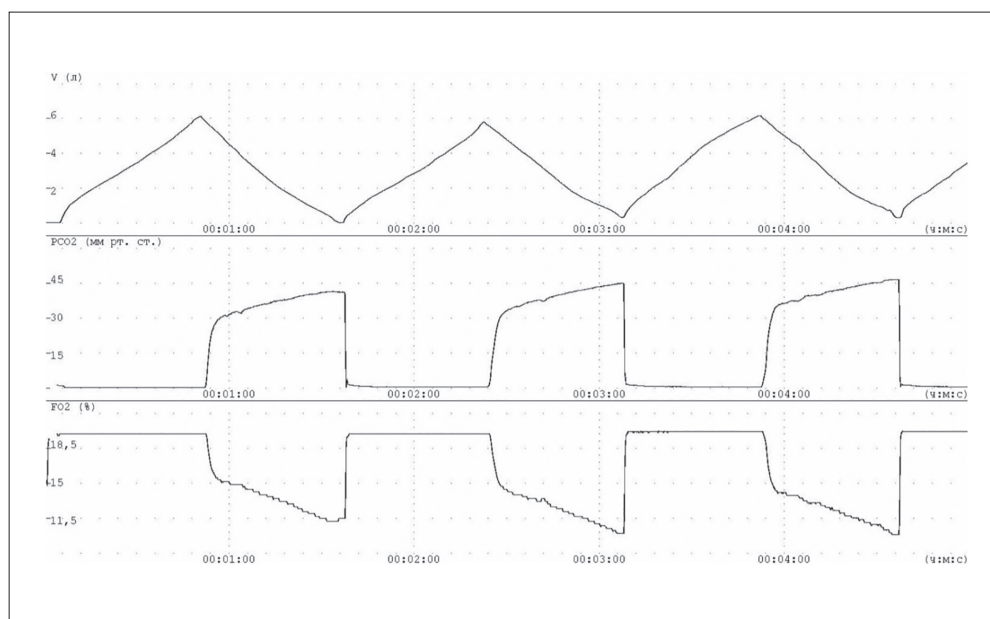


Рис. 2. Пример протокола спирографии (верхний график) и газоанализа (средний график – PCO₂ и нижний график – FeO₂); частота дыхания около 0,66 раза/мин – длительность вдоха и выдоха по 45 секунд

Fig. 2. An example of a spirography protocol (upper graph) and gas analysis (middle graph—PCO₂ and lower graph – FeO₂); respiratory rate about 0.66 times/min—the duration of inhalation and exhalation for 45 seconds

Заключение

Дыхательные упражнения йоги, сопровождающиеся снижением частоты дыхания до 1–1,5 раза/мин., являются гиповентиляционными и во время их выполнения приводят к развитию альвеолярной гиперкапнии и гипоксии. Не требуя использования специального оборудования и тренажеров, дыхательные упражнения йоги могут выступать в качестве доступной методики гипоксически-гиперкапнического тренинга.

Сопоставляя результаты этой работы с накопленными научными данными о влиянии гиперкапнии и гипоксии

на мозговой кровоток и цереброваскулярную реактивность, можно предполагать, что освоение и регулярная практика дыхательных упражнений йоги, использующих режимы произвольной и контролируемой гиповентиляции, способны оказывать положительное влияние на процессы мозгового кровообращения, механизмы нейропротекции, толерантность мозговой ткани к ишемии; для уточнения данного тезиса также необходимы дальнейшие исследования.

Список литературы

- 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): 1450-8. <https://doi.org/10.1111/j.1471-4159.2008.05516.x>
- 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. <https://doi.org/10.1111/j.1471-4159.2010.06816.x>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2013.08.014>
- Tregub P., Kulikov V., Beshpalov A. Tolerance to acute hypoxia maximally increases in case of joint effect of normobaric hypoxia and permissive hypercapnia in rats. *Pathophysiology*. 2013; 20(3): 165-70. <https://doi.org/j.pathophys.2013.09.001>
- Tregub P., Kulikov V., Motin Y., Beshpalov 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): 381-7. <https://doi.org/10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2014.09.003>
- Трегуб П.П., Куликов В.П., Малиновская Н.А. Механизмы нейропротекторного эффекта сочетанного воздействия гипоксии и гиперкапнии. *Сибирское медицинское обозрение*. 2018; (3): 5-13. <https://doi.org/10.20333/2500136-2018-3-5-13>
- Ежов В.В., Мизин В.И., Царев А.Ю., Платунова Т.Е. Тренировки дыхательных мышц в движении в физической реабилитации больных с хронической ишемией мозга. *Вестник восстановительной медицины*. 2020; 6(100): 19-24. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2020-100-6-19-24>
- Карачинцева Н.В., Можейко Е.Ю. Применение физиотерапии при мозговом инсульте с позиции доказательной медицины. *Вестник восстановительной медицины*. 2021; 20(1): 27-34. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2021-20-1-27-34>
- 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): 1207-11. <https://doi.org/10.1006/nimg.2001.0760>
- Reivich M. Arterial PCO₂ and cerebral hemodynamics. *American Journal of Physiology*. 1964;(206): 25-35. <https://doi.org/10.1152/ajplegacy.1964.206.1.25>
- Tancredi F.B., Hoge R.D. Comparison of cerebral vascular reactivity measures obtained using breath-holding and CO₂ inhalation. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*. 2013; (33): 1066-74. <https://doi.org/10.1038/jcbfm.2013.48>
- Kulikov V.P., Beshpalova A.G., Yakuseva N.N. The state of cerebral hemodynamics in conditions of prolonged adaptation to hypercapnic hypoxia. *Neuroscience and Behavioral Physiology*. 2009; 39(3): 269-73. <https://doi.org/10.1007/s11055-009-9121-y>
- Miyamura M., Nishimura K., Ishida K., Katayama K., Shimaoka M., and 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): 313-6. <https://doi.org/10.2170/jjphysiol.52.313>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.resp.2016.07.005>
- 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): 62-4.
- Bright M.G., Bulte D.P., Jezzard P., Duyn J.H. Characterization of regional heterogeneity in cerebrovascular reactivity dynamics using novel hypocapnia task and BOLD fMRI. *NeuroImage*. 2009; (48): 166-75. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.05.026>
- Markus H., Cullinane M. Severely impaired cerebrovascular reactivity predicts stroke and TIA risk in patients with carotid artery stenosis and occlusion. *Brain*. 2001; (124): 457-67. <https://doi.org/10.1093/brain/124.3.457>

References

- 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): 1450-8. <https://doi.org/10.1111/j.1471-4159.2008.05516.x>
- 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. <https://doi.org/10.1111/j.1471-4159.2010.06816.x>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2013.08.014>
- Tregub P., Kulikov V., Beshpalov A. Tolerance to acute hypoxia maximally increases in case of joint effect of normobaric hypoxia and permissive hypercapnia in rats. *Pathophysiology*. 2013; 20(3): 165-70. <https://doi.org/j.pathophys.2013.09.001>
- Tregub P., Kulikov V., Motin Y., Beshpalov 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): 381-7. <https://doi.org/10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2014.09.003>
- Tregub P.P., Kulikov V.P., Malinovskaya N.A. Mekhanizmy nejroprotektornogo efekta sochetannogo vozdejstviya gipoksii i giperkapnii [Neuroprotective Effect Mechanisms of Hypoxia and Hypercapnia Combined Impact]. *Siberian Medical Review*. 2018; (3): 5-13. <https://doi.org/10.20333/2500136-2018-3-5-13> (In Russ.).
- Ezhov V.V., Mizin V.I., Tsarev A.Yu., Platunova T.E. Trenirovki dykhatel'nykh myshts v dvizhenii v fizicheskoj rehabilitatsii bolnykh s khronicheskoj ishemiej mozga [Training of Respiratory Muscles in Motion in the Physical Rehabilitation of Patients with Chronic Cerebral Ischem]. *Bulletin of Rehabilitation Medicine*. 2020; 6 (100): 19-24. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2020-100-6-19-24> (In Russ.).
- Karachintseva N.V., Mozhejko E.Yu. Primeneniye fizioterapii pri mozgovom insulte s pozitsii dokazatelnoj mediciny [The Application of Physiotherapy in Cerebral Stroke from the Evidence-Based Medicine Standpoint]. *Bulletin of Rehabilitation Medicine*. 2021; 20(1): 27-34. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2021-20-1-27-34> (In Russ.).
- 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): 1207-11. <https://doi.org/10.1006/nimg.2001.0760>
- Reivich M. Arterial PCO₂ and cerebral hemodynamics. *American Journal of Physiology*. 1964;(206): 25-35. <https://doi.org/10.1152/ajplegacy.1964.206.1.25>
- Tancredi F.B., Hoge R.D. Comparison of cerebral vascular reactivity measures obtained using breath-holding and CO₂ inhalation. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*. 2013; (33): 1066-74. <https://doi.org/10.1038/jcbfm.2013.48>
- Kulikov V.P., Beshpalova A.G., Yakuseva N.N. The state of cerebral hemodynamics in conditions of prolonged adaptation to hypercapnic hypoxia. *Neuroscience and Behavioral Physiology*. 2009; 39(3): 269-73. <https://doi.org/10.1007/s11055-009-9121-y>
- Miyamura M., Nishimura K., Ishida K., Katayama K., Shimaoka M., and 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): 313-6. <https://doi.org/10.2170/jjphysiol.52.313>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.resp.2016.07.005>
- 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 [The Use of Capnometry in Pulmonology]. *Practical Pulmonology*. 2016; (3): 62-4 (In Russ.).
- Bright M.G., Bulte D.P., Jezzard P., Duyn J.H. Characterization of regional heterogeneity in cerebrovascular reactivity dynamics using novel hypocapnia task and BOLD fMRI. *NeuroImage*. 2009; (48): 166-75. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.05.026>
- Markus H., Cullinane M. Severely impaired cerebrovascular reactivity predicts stroke and TIA risk in patients with carotid artery stenosis and occlusion. *Brain*. 2001; (124): 457-67. <https://doi.org/10.1093/brain/124.3.457>

Информация об авторах:

Фролов Артем Владимирович, ректор, ООО «Санкт-Петербургский институт восточных методов реабилитации».

E-mail: polyclinic@list.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8774-6996>

Ермолаева Саргылана Александровна, преподаватель, ООО «Санкт-Петербургский институт восточных методов реабилитации».

E-mail: supersagi@gmail.com, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-4754-9255>

Маничев Игорь Александрович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, заместитель директора, ООО «Белинтелмед».

E-mail: marketing@belintelmed.by, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-4446-3731>

Вклад авторов:

Фролов А.В. – обзор публикаций по теме статьи, разработка дизайна исследования, отбор и обследование пациентов, обработка, анализ и интерпретация данных, написание текста рукописи; Ермолаева С.А. – обработка, анализ и интерпретация данных, статистическая обработка данных, написание текста рукописи; Маничев И.А. – разработка, проектирование и руководство процессом изготовления оборудования, анализ и интерпретация данных.

Information about the authors:

Artem V. Frolov, Rector, Saint-Petersburg Institute of Oriental Rehabilitation Methods.

E-mail: polyclinic@list.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8774-6996>

Sargylana A. Ermolaeva, Lecturer, Saint-Petersburg Institute of Oriental Rehabilitation Methods.

E-mail: supersagi@gmail.com, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-4754-9255>

Igor A. Manichev, Can. Sci. (Phys-Math.), Researcher, Deputy Director, Belintelmed LLC.

E-mail: marketing@belintelmed.by, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-4446-3731>

Contribution:

Frolov A.V. – review of publications on the topic of the article, development of research design, selection and examination of patients, processing, analysis and interpretation of data, writing the text of the manuscript; Ermolaeva S.A. – data processing, analysis and interpretation, statistical data processing; Manichev I.A. – development, design and management of the equipment manufacturing process, data analysis and interpretation.

