

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2020

Бяловский Ю.Ю.<sup>1</sup>, Кирюшин В.А.<sup>1</sup>, Прохоров Н.И.<sup>2</sup>, Ракитина И.С.<sup>1</sup>, Чудинин Н.В.<sup>1</sup>

## Газовый состав альвеолярного воздуха и переносимость средств индивидуальной защиты органов дыхания

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО РязГМУ Минздрава России, 390026, Рязань;<sup>2</sup>ФГАУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России, 119991, Москва

**Введение.** При использовании средств индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД) изолирующего типа в случае истощения регенеративного патрона возникают гипоксически-гиперкапнические изменения газового состава выдыхаемого воздуха, которые оказывают негативное влияние на переносимость СИЗОД. Сочетание дополнительного респираторного сопротивления (ДРС) с гипоксией и гиперкапнией ещё больше ухудшает переносимость СИЗОД.

**Цель исследования** – изучение переносимости средств индивидуальной защиты органов дыхания при изменении газового состава альвеолярного воздуха.

**Материал и методы.** Исследование проводилось на практически здоровых испытуемых обоего пола (78 человек), в возрасте от 20 до 36 лет. Для моделирования условий применения средств индивидуальной защиты органов дыхания использовались инспираторные резистивные дыхательные нагрузки величиной 20% от максимального внутриротового давления при пробе Мюллера. Переносимость СИЗОД оценивалась с помощью шкалы визуального аналога одышки по Боргу, которая отражала уровень субъективного дискомфорта, возникающего при включении ДРС. Методика изменения газового состава альвеолярного воздуха у испытуемых состояла в использовании системы, позволявшей добавлять в закрытый контур спирографа кислород из магистрали, а также включать и отключать адсорбер углекислого газа.

**Результаты.** Переносимость средств индивидуальной защиты органов дыхания связана с характером газового состава альвеолярного воздуха: минимум субъективного дискомфорта наблюдался при наличии гипероксически-гипокапнического состава лёгочного воздуха; напротив, рост субъективного дискомфорта по шкале Борга наблюдался при пониженном содержании кислорода и увеличенной концентрации углекислого газа. Использование средств индивидуальной защиты органов дыхания на фоне гипоксии-гиперкапнии изменяло функциональное состояние организма: наблюдался рост физиологических затрат со стороны ведущих эффекторов. Нормализация газового состава организма в условиях применения средств индивидуальной защиты органов дыхания не приводила к полной оптимизации функционального состояния испытуемых.

**Заключение.** Гипоксия и гиперкапния, возникающие при истощении регенеративных патронов СИЗОД изолирующего типа, приводят к существенному ухудшению переносимости ДРС. Предполагаемым механизмом данного явления следует считать повышение утомления дыхательных мышц.

**К л ю ч е в ы е с л о в а :** дополнительное респираторное сопротивление; газовый состав альвеолярного воздуха; средства индивидуальной защиты органов дыхания.

**Для цитирования:** Бяловский Ю.Ю., Кирюшин В.А., Прохоров Н.И., Ракитина И.С., Чудинин Н.В. Газовый состав альвеолярного воздуха и переносимость средств индивидуальной защиты органов дыхания. *Гигиена и санитария*. 2020; 99 (1): 51-55. DOI: <http://dx.doi.org/10.33029/0016-9900-2020-99-1-51-55>

**Для корреспонденции:** Бяловский Юрий Юльевич, доктор мед. наук, заведующий кафедрой патофизиологии ФГБОУ ВО РязГМУ Минздрава России, 390026, Рязань. E-mail: [b\\_uu@mail.ru](mailto:b_uu@mail.ru)

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Участие авторов:** концепция и дизайн исследования – Бяловский Ю.Ю.; сбор и обработка материала – Бяловский Ю.Ю., Ракитина И.С.; статистическая обработка – Бяловский Ю.Ю., Ракитина И.С., Чудинин Н.В.; написание текста – Бяловский Ю.Ю., Кирюшин В.А., Прохоров Н.И., Ракитина И.С., Чудинин Н.В.; редактирование – Кирюшин В.А., Прохоров Н.И.; утверждение окончательного варианта статьи – Прохоров Н.И.; ответственность за целостность всех частей статьи – Бяловский Ю.Ю.

Поступила: 04.10.19

Принята к печати: 12.12.19

Опубликована: 27.02.2020

Byalovsky Yu.Yu.<sup>1</sup>, Kiryushin V.A.<sup>1</sup>, Prokhorov N.I.<sup>2</sup>, Rakitina I.S.<sup>1</sup>, Chudin N.V.<sup>1</sup>

## Gas composition of alveolar air and tolerability of personal respiratory protection equipment

<sup>1</sup>Ryazan State Medical University, Ryazan, 390026, Russian Federation;<sup>2</sup>I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow, 119991, Russian Federation

**Introduction.** When using personal protective equipment for respiratory organs of an insulating type in case of depletion of a regenerative cartridge, hypoxic-hypercapnic changes in the gas composition of the body occur, which have a negative effect on the tolerance of personal protective equipment for respiratory organs. The combination of additional respiratory resistance with hypoxia and hypercapnia further worsens the tolerance of respiratory protective equipment. The purpose of this study was to study the tolerance of personal respiratory protection when changing the gas composition of the alveolar air.

**Material and methods.** The study was conducted on healthy subjects of both sexes (78 people), aged 20 to 36 years. To simulate the conditions for the use of personal respiratory protective equipment, inspiratory resistive respiratory loads of 20% of the maximum intraoral pressure were used during the Mueller test. The tolerance of respiratory protective equipment was evaluated using the Borg visual analog scale of dyspnea, which reflected the level of subjective discomfort occurring due to additional respiratory resistance is turned on. The methodology for changing the gas composition of the alveolar air in the

subjects consisted of using a system that allowed adding oxygen from the line to the closed spiograph circuit and turning the carbon dioxide adsorber on and off.

**Results.** The tolerance of personal respiratory protection is associated with the nature of the gas composition of the alveolar air. A minimum of subjective discomfort was observed in the presence of hyperoxic-hypocapnic composition of the pulmonary air; on the contrary, an increase in subjective discomfort on the Borg scale was observed with a reduced oxygen content and an increased concentration of carbon dioxide. The use of personal respiratory protective equipment against the background of hypoxia-hypercapnia negatively changes the functional state of the body: there was observed an increase in physiological expenditures by leading effectors. Normalization of the gas composition of the body under the use of personal respiratory protection did not lead to complete optimization of the functional state of the subjects.

**Conclusion.** Hypoxia and hypercapnia arising from the depletion of regenerative cartridges of the respiratory protective equipment of an insulating type leads to a significant deterioration in the tolerance to additional respiratory resistance. The alleged mechanism of this phenomenon should be considered as an increase in fatigue of the respiratory muscles.

*Key words:* additional respiratory resistance; gas composition of alveolar air; personal respiratory protection.

**For citation:** Byalovsky Yu.Yu., Kiryushin V.A., Prokhorov N.I., Rakitina I.S., Chudin N.V. Gas composition of alveolar air and tolerability of personal respiratory protection equipment. *Gigiena i Sanitarna (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2020; 99 (1): 51-55. (In Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.33029/0016-9900-2020-99-1-51-55>

**For correspondence:** Yury Yu. Byalovsky, MD, Ph.D., DSci., Head of the Department of Pathophysiology of the Ryazan State Medical University, Ryazan, 390026, Russian Federation. E-mail: [b\\_uu@mail.ru](mailto:b_uu@mail.ru)

#### Information about authors:

Byalovsky Yury Yu., <http://orcid.org/0000-0002-6769-8277>; Kiryushin V.A., <http://orcid.org/0000-0002-1258-9807>

Prokhorov N.I., <http://orcid.org/0000-0002-4510-2890>; Rakitina I.S., <http://orcid.org/0000-0002-9406-1765>; Chudin N.V. <http://orcid.org/0000-0002-2441-9522>

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Acknowledgment.** The study had no sponsorship

**Contribution:** The concept and design of the research – Byalovsky Yu.Yu. Collection and processing of material – Byalovsky Yu.Yu., Rakitina I.S. Statistical processing – Byalovsky Yu.Yu., Rakitina I.S., Chudin N.V. Writing the text – Byalovsky Yu.Yu., Kiryushin V.A., Prokhorov N.I., Rakitina I.S., Chudin N.V. Editing – Kiryushin V.A., Prokhorov N.I. Approval of the final version of the manuscript – Prokhorov N.I. Responsibility for the integrity of all parts of the manuscript – Byalovsky Yu.Yu.

Received: October 4, 2019

Accepted: December 12, 2019

Published: February 27, 2020

## Введение

В системе защиты и охраны здоровья работающих одно из важных мест занимают средства индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД) [1–3]. Их использование обусловлено в первую очередь тем, что зачастую меры инженерно-технологического и санитарно-гигиенического характера в промышленном производстве, горнодобывающих предприятиях и других отраслях промышленности не позволяют добиться снижения содержания вредных веществ в воздухе рабочей зоны до допустимых уровней, безопасных для здоровья. В таких условиях повышение эффективности СИЗОД для защиты работающих трудно переоценить [4, 5].

Одной из проблем низкой эффективности СИЗОД является нерегулярное их использование в загрязнённой атмосфере. Отчасти это связано с плохой переносимостью СИЗОД, преимущественно из-за субъективного дискомфорта работающего [6]. Факторы, снижающие переносимость СИЗОД, можно разделить на технологические (выдача масок, не соответствующих лицам по форме и/или размеру; запоздалая замена противогазных фильтров) и физиологические [7, 8]. К последним следует отнести дополнительное респираторное сопротивление (ДРС), возникающее при использовании СИЗОД [9]. Речь идёт не только о СИЗОД фильтрующего типа, но и конструкция изолирующего типа. В работе последних ключевая роль принадлежит регенеративному патрону для получения кислорода, необходимого для дыхания, и поглощения углекислого газа, содержащегося в выдыхаемом воздухе. При истощении регенеративного патрона возникают гипоксически-гиперкапнические изменения газового состава выдыхаемого воздуха, которые оказывают негативное влияние на переносимость СИЗОД [10]. К сожалению, в доступной литературе практически отсутствуют сведения об изменении переносимости СИЗОД при сочетании ДРС и изменениях газового состава альвеолярного воздуха.

Целью исследования явилось изучение переносимости средств индивидуальной защиты органов дыхания при изменении газового состава альвеолярного воздуха.

Задачами, стоящими перед исследованием, являлись: а) определение зависимости между показателями газового состава альвеолярного воздуха и переносимостью СИЗОД; б) оценка функционального состояния испытуемых при изменении газовой

состава альвеолярного воздуха на фоне ДРС; в) выделение факторов (компонент) функционального состояния испытуемых, обеспечивающих наибольшую переносимость СИЗОД в условиях изменения газового состава.

## Материал и методы

Исследование проводилось на практически здоровых добровольцах обоего пола (78 человек), в возрасте от 20 до 36 лет. Для моделирования условий применения средств индивидуальной защиты органов дыхания использовались инспираторные резистивные дыхательные нагрузки. Величина используемых резистивных нагрузок определялась исходя из значения максимального внутриротового давления при выполнении пробы Мюллера [11]. Проба Мюллера состояла в том, что испытуемый производил вдох при полностью перекрытых ротовой полости и носовых ходах; полученное при этом внутриротовое давление принималось за 100% (100%P<sub>тmax</sub>). Затем, во время действия резистивной нагрузки, посредством оригинального устройства [12] внутриротовое давление удерживалось на уровне 20%P<sub>тmax</sub>, наиболее близком к диапазону сопротивлений большинства используемых СИЗОД [13, 14].

Переносимость СИЗОД оценивалась с помощью шкалы визуального аналога одышки по Боргу [15], которая отражала уровень субъективного дискомфорта, возникающего при включении ДРС [16]. Перед глазами испытуемого располагалась светодиодная матрица, отражавшая степень затруднения дыхания в диапазоне от 0 (нетруднённое дыхание) до 10 (невозможность терпеть). Во время действия ДРС с помощью джойстика испытуемый мог отражать на матрице текущий уровень затруднения дыхания, который фиксировался компьютером [17].

Методика изменения газового состава альвеолярного воздуха у испытуемых [18] состояла в использовании системы, позволявшей добавлять в закрытый контур спирографа кислород из магистрали, а также включать и отключать адсорбер углекислого газа.

У испытуемых регистрировали следующие физиологические показатели: пневмотахограмму и интегрированную спирограмму, давление в полости рта, содержание O<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub> в альвеолярном воздухе, оксигемогамму периферической крови, кожно-гальваническую реакцию, интегрированную ЭМГ межрёберных мышц, газовый состав и кислотно-щелочное состояние артериальной

Таблица 1

Парциальные давления кислорода ( $PAO_2$ , мм рт. ст.) и углекислого впрок газа ( $PACO_2$ , мм рт. ст.) альвеолярного воздуха в разных экспериментальных сериях

Название экспериментальной серии	$PAO_2$	$PACO_2$
Гипоксически-гиперкапническая стимуляция	81,0 ± 3,48	50,5 ± 1,22
Гипоксически-изокапническая стимуляция	82,7 ± 2,94	40,7 ± 0,92
Гипоксически-гипокапническая стимуляция	82,4 ± 2,41	32,1 ± 1,60
Нормоксически-гиперкапническая стимуляция	98,5 ± 3,10	50,1 ± 1,04
Нормоксически-гипокапническая стимуляция	101,7 ± 3,46	32,8 ± 0,88
Гипероксически-гиперкапническая стимуляция	152,6 ± 6,84	49,7 ± 1,30
Гипероксически-изокапническая стимуляция	155,2 ± 4,72	39,2 ± 0,84
Гипероксически-гипокапническая стимуляция	154,5 ± 4,68	31,8 ± 1,03

крови, интегральную реограмму тела, измерялись пороги восприятия респираторных нагрузок и уровень возникающей одышки Borg. Физиологическая информация посредством информационно-диагностической системы [19] поступала в компьютер, где просчитывались важнейшие производные: парциальное давление  $O_2$  и  $CO_2$  альвеолярного воздуха ( $PAO_2$ ,  $PACO_2$ ); альвеолярная вентиляция (VA); работа дыхания (W); сопротивление воздухоносных путей (Raw); суммарные (валовые) энергозатраты (E); минутный объем кровообращения (МОК); периферическое сопротивление сосудов (ПСС).

Материал обработан с использованием автоматизированного пакета StatGraphics Plus for Windows v. 5.4.

## Результаты

У испытуемых моделировались изменения газового состава альвеолярного воздуха от гипоксически-гиперкапнических до гипероксически-гипокапнических, всего 8 вариантов газового состава (табл. 1).

На фоне изменений газового состава альвеолярного воздуха изучались реакции  $20\%Pm_{max}$ . Анализировались следующие показатели: прирост ощущения затруднения дыхания (по отношению к незатрудненному, свободному дыханию – 100%), шкала Борга, %; парциальное давление кислорода и углекислого газа в лёгких ( $PAO_2$ ,  $PACO_2$ , мм рт. ст.); вентиляционная чувствительность к углекислому газу ( $\Delta MOD/\Delta CO_2$ , ед.); минутный объем дыхания (МОД, л/мин), работа дыхательных мышц (кг/мин), частота дыхательных движений (f, мин<sup>-1</sup>).

Мы провели однофакторный дисперсионный анализ влияния газового состава альвеолярного воздуха (организованный фактор, восемь градаций) на ощущение затруднения дыхания (измеряемый признак) по шкале Борга в условиях ДРС. Было получено значительное статистически достоверное влияние газового состава на переносимость ДРС ( $F = 25,5$ ;  $p = 0,0000039$ ), при этом сила влияния организованного фактора на 84,5% определяла изменения измеряемого признака. Таким образом, при моделировании ДРС  $20\%Pm_{max}$  именно изменения газового состава альвеолярного воздуха (а не какие-нибудь иные не учтённые нами факторы), на 84,5% определяют степень переносимости ДРС.

На рис. 1 представлена зависимость прироста ощущения затруднения дыхания (шкала Борга, %) к ДРС  $20\%Pm_{max}$  от изменений газового состава альвеолярного воздуха ( $PAO_2$ ,  $PACO_2$ ). Можно отметить, что переносимость ДРС (по критерию прироста ощущения затруднения дыхания по шкале Борга, %) связана с газовым составом альвеолярного воздуха: увеличение переноси-

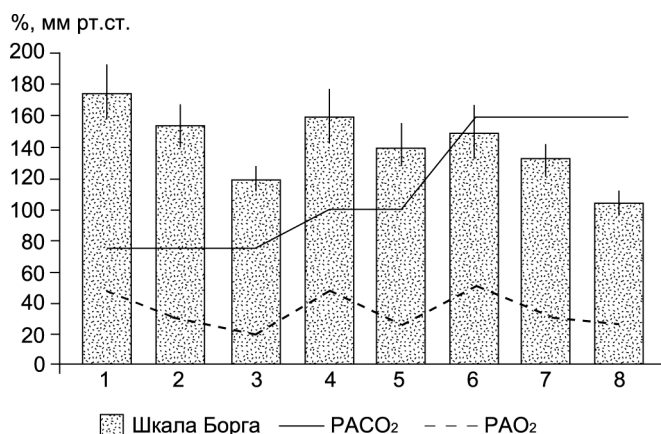


Рис. 1. Зависимость ощущения затруднения дыхания по шкале Борга (в процентах к незатрудненному свободному дыханию – 100%) в условиях ДРС  $20\%Pm_{max}$  от газового состава альвеолярного воздуха ( $PACO_2$ ,  $PAO_2$ , мм рт. ст.).

мости ДРС наблюдалось при повышенном содержании кислорода и пониженном содержании углекислого газа; напротив, снижение переносимости ДРС наблюдалось при понижении содержания кислорода и увеличении парциального давления углекислого газа.

На рис. 2 представлены показатели сдвигов функционального состояния испытуемых во время действия ДРС  $20\%Pm_{max}$  при наличии гипероксически-гипокапнического (а) и гипоксически-гиперкапнического составов альвеолярного воздуха (б). Как следует из представленных данных, низкая переносимость ДРС на фоне гипоксически-гиперкапнической стимуляции дыхания преимущественно связана с ростом работы дыхательной мускулатуры, утомление которой, по литературным данным, является ведущим фактором, лимитирующим переносимость ДРС [20, 21]. Обращает на себя внимание, что даже в отсутствии газовой стимуляции дыхания (гипероксически-гипокапнический состав альвеолярного воздуха) физиологические затраты испытуемых превышают физиологические траты в условиях незатрудненного дыхания. Это позволяет предположить разные механизмы стимуляции дыхания через газовый состав организма и механорецепцию лёгких и дыхательных мышц.

Мы изучили факторную структуру функционального состояния испытуемых при реализации  $20\%Pm_{max}$  в условиях разных газовых составов альвеолярного воздуха. Для этого была получена корреляционная матрица указанных выше признаков ( $PAO_2$ ,  $PACO_2$ ,  $\Delta MOD/\Delta CO_2$ , МОД, f, шкала Борга) и проанализирована её внутренняя структура с помощью метода главных компонент Хотеллинга (табл. 2).

В результате решения данной задачи было установлено, что для объяснения связи переносимости ДРС со всеми показателями функционального состояния можно ограничиться тремя главными компонентами с накопленным вкладом 92,3% общей дисперсии. Для облегчения интерпретации главных компонент необходима бо-

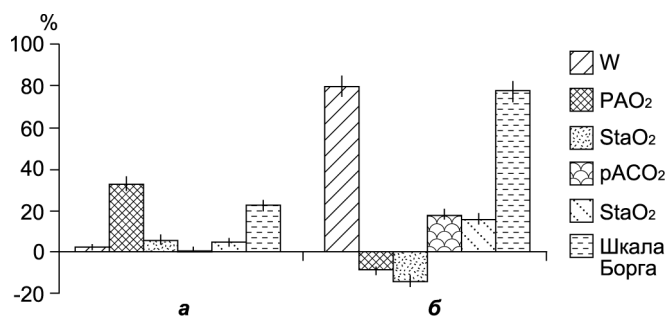


Рис. 2. Показатели сдвигов функционального состояния испытуемых во время действия ДРС  $20\%Pm_{max}$  при наличии гипероксически-гипокапнического (а) и гипоксически-гиперкапнического составов альвеолярного воздуха (б).



Таблица 2

**Факторная матрица показателей функционального состояния испытуемых при изменении газового состава альвеолярного воздуха, полученная после вращения осей главных компонент по критерию  $Vari_{\max}$  (резистивная нагрузка  $20\%Pm_{\max}$ )**

Переменная	Главный компонент (фактор)		
	1	2	3
Шкала Борга	0,27459	0,90375	0,26481
$PAO_2$	0,94375	0,21018	0,12575
$PAO_2$	0,89112	0,09437	0,32144
$\Delta MOD/CO_2$	0,33710	0,24388	0,81420
W	0,03781	0,93012	0,10652
f	0,07229	0,37890	0,85217
МОД	0,31682	0,05281	0,81679

лее тесная привязка их к определённым группам наблюдавшихся признаков. Это достигалось путём вращения осей главных компонент в пространстве признаков до нахождения оптимального решения по критерию  $Vari_{\max}$  (без перемещения диагональных элементов общности). В таком оптимальном решении вновь полученные три главных фактора будут иметь тот же накопленный вклад 92,3% в объяснение дисперсии всех признаков и более выраженные нагрузки (корреляции) с определёнными группами признаков.

В табл. 2 представлены результаты компонентного анализа, полученные после вращения факторной матрицы. По факторной матрице интерпретируем главные факторы (ГФ). Первый ГФ, сильно связанный с признаками  $PAO_2$ ,  $PACO_2$ , следует обозначить как условия газовой среды индивида, определяющие переносимость ДРС. Второй ГФ, прямо и сильно связанный с признаками W и шкалой Борга, можно назвать как психоэмоциональное напряжение в связи с работой дыхательной мускулатуры. Третий ГФ, сильно связанный с  $\Delta MOD/\Delta CO_2$ , f и МОД, можно интерпретировать как вентиляторный драйв (привод), обеспечивающий определённый уровень вентиляции. Таким образом, используемые градации газового состава альвеолярного воздуха изменяют переносимость ДРС через определённые компоненты (факторы) функционального состояния. Факторами, обеспечивающими газовую (химическую) стимуляцию дыхания, в условиях  $20\%Pm_{\max}$  являются психоэмоциональное напряжение в связи с работой дыхательной мускулатуры, а также газовая вентиляторная чувствительность, определяющая передаточные отношения газового состава и вентиляции (частоту и глубину дыхания). Относительно высокие факторные нагрузки (см. табл. 2), объясняемые работой дыхательных мышц (W), позволяют предположить ведущий вклад данного компонента в обеспечение переносимости ДРС.

## Обсуждение

В настоящем исследовании было подтверждено положение о том, что гипоксия и гиперкапния, возникающие при истощении регенеративных патронов СИЗОД изолирующего типа, приводят к

существенному ухудшению переносимости ДРС [22, 23]. Физиологическим механизмом данного явления следует считать суммацию возбуждений на входе центрального дыхательного регулятора от хеморецептивного аппарата (преимущественно центральные хеморецепторы дна 4-го желудочка мозга) механорецептивного контура, представленного рецепторами растяжения лёгких и проприорецепторами дыхательных мышц [24–26].

Сопоставление афферентных потоков химической и механической стимуляции дыхательного центра позволяет предположить, что эти потоки могут как усиливать, так и ослаблять центральную инспираторную активность. Снижение газовой стимуляции дыхания путём замены гипоксически-гиперкапнических стимулов на гипероксически-гипокапнические приводило к оптимизации функционального состояния испытуемых по критерию улучшения переносимости ДРС и уменьшению работы ведущих эфффекторов, прежде всего дыхательной мускулатуры.

Весьма существенным обстоятельством следует считать тот факт, что нормализация газового состава не приводила к полной оптимизации функционального состояния испытуемых. Наиболее «узким» эфффектором, лимитирующим переносимость ДРС, является дыхательная мускулатура [29, 28]. Именно утомление дыхательных мышц даёт психоэмоциональное напряжение, являющееся непосредственной причиной отказа от дальнейшего преодоления резистивной нагрузки. Эти данные согласуются с высказываемым рядом исследователей [29, 30] положением о том, что именно работа дыхательной мускулатуры является ведущим «ценовым» фактором, ограничивающим переносимость ДРС. Убедительные доказательства роли утомления респираторных мышц в развитии дыхательной недостаточности предоставляют клинические наблюдения больных с тяжёлой формой бронхиальной астмы [31–33].

## Заключение

1. Переносимость средств индивидуальной защиты органов дыхания связана с характером газового состава альвеолярного воздуха: минимум субъективного дискомфорта наблюдался при наличии гипероксически-гипокапнического состава лёгочного воздуха; напротив, рост субъективного дискомфорта по шкале Борга отмечен при пониженном содержании кислорода и увеличенной концентрации углекислого газа.

2. Использование средств индивидуальной защиты органов дыхания на фоне различного газового состава альвеолярного воздуха изменяет функциональное состояние организма: гипоксия-гиперкапния вызывает рост физиологических трат со стороны ведущих эфффекторов; гипероксия-гипокапния эти траты уменьшает.

3. Нормализация газового состава организма в условиях применения средств индивидуальной защиты органов дыхания не приводила к полной оптимизации функционального состояния испытуемых, что связано с прогрессирующим утомлением дыхательной мускулатуры.

4. Изменение газового состава альвеолярного воздуха влияет на переносимость средств индивидуальной защиты органов дыхания через определённые компоненты функционального состояния, среди которых наиболее значимыми являются работа дыхательных мышц и газовая вентиляторная чувствительность дыхательного центра.

## Литература (пп. 15, 18, 22, 31–33 см. References)

1. Чашин В.П., Никанов А.Н., Анфалова Г.Л. Анализ эффективности средств индивидуальной защиты органов дыхания от пыли на предприятиях по переработке слюды. *Экология человека*. 2006; 4: 55–8.
2. Капцов В.А., Чиркин А.В. Об эффективности средств индивидуальной защиты органов дыхания как средства профилактики заболеваний (обзор). *Токсикологический вестник*. 2018; 2: 2–4.
3. Чудинин Н.В., Кирюшин В.А., Ракитина И.С. Оценка профессионального риска как метод прогнозирования состояния здоровья работников, занятых во вредных условиях труда. *Наука молодых – Eruditio Juvenium*. 2013; 1: 5–7.
4. Малашенко А.В. Многофакторный генез профессиональной лёгочной патологии у горнорабочих урановых шахт. *Медицинская радиология*. 2010; 2: 5–8.
5. Голінько В.І., Наумов М.М., Чеберячко С.І., Радчук Д.І. Дослідження захисної ефективності вітчизняних одноразових протипилових респіраторів за європейськими стандартами. *Металургічна промисловість*. 2011; 5: 118–21.
6. Сорокин Ю.Г. Новое в средствах индивидуальной защиты. *Безопасность жизнедеятельности*. 2006; 1: 11–7.
7. Романов В.В., Рубцов В.И., Клочков В.Н., Суворцев Н.А., Тимошенко А.И. Государственный санитарно-эпидемиологический надзор за средствами индивидуальной защиты органов дыхания на радиационно опасных объектах. *Гигиена и санитария*. 2006; 4: 78–81.
8. Петрянов И.В., Кошечев В.С., Басманов П.И. и соавт. *Лёгкие респираторы*. 2-е изд. М.: Наука; 2015.

9. Бяловский Ю.Ю., Булатецкий С.В., Кирышин В.А., Прохоров Н.И. Иммунологические показатели человека в условиях применения индивидуальных средств защиты органов дыхания. *Гигиена и санитария*. 2017; 96 (8): 717–20.
10. Кириллов В.Ф. и соавт. О средствах индивидуальной защиты органов дыхания работающих. *Медицина труда и промышленная экология*. 2013; 4: 25–6.
11. Александрова Н.П. Механизмы компенсаторных реакций дыхательной системы на инспираторные резистивные нагрузки. Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. СПб.; 2003.
12. Бяловский Ю.Ю., Абросимов В.Н. Пневматический дозатор внешнего сопротивления дыханию. Описание изобретения к патенту Российской Федерации № 2071790; 1997.
13. Шаталов Э.В., Щербак М.Г., Балдыч А.А., Дроздов С.Н. Медико-технические аспекты эксплуатации средств индивидуальной защиты военнослужащего. *Военная мысль*. 2008; 4: 40–5.
14. Миронов Л.А. *Применение средств индивидуальной защиты*. Н. Новгород: Биота-плюс; 2009.
16. Бяловский Ю.Ю., Булатецкий С.В. *Физиологические механизмы резистивного дыхания человека*. Воронеж: РИТМ; 2018.
17. Бяловский Ю.Ю. Реципрокные реакции организма на разные величины увеличенного сопротивления дыханию. *Российский медико-биологический вестник имени академика И.П. Павлова*. 2016; 1: 19–25.
19. Белов А.Ф., Бяловский Ю.Ю., Лапкин М.М. *Информационно-диагностическая система для психофизиологических исследований человека*. Рязань; 1990.
20. Суслина И.В. Повышение функционального состояния дыхательной мускулатуры спортсменов в результате тренировки с дополнительным неэластическим сопротивлением дыханию. *Физическое воспитание и спортивная тренировка*. 2016; 2 (16): 63–5.
21. Горбанёва Е.П., Камчатников А.Г., Солопов И.Н., Сегизбаева М.О., Александрова Н.П. Оптимизация функции дыхания посредством тренировки с дополнительным резистивным сопротивлением. *Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова*. 2011; 97 (1): 83–8.
23. Капцов В.А., Чиркин А.В. Об оценке эффективности средств индивидуальной защиты органов дыхания. *Безопасность в техносфере*. 2015; 4 (5): 7–8.
24. Ведясова О.А., Еськов М.В., Филатова О.Е. *Системный компартментно-кластерный анализ механизмов устойчивости дыхательной ритмики млекопитающих*. Самара: Офорт; 2005.
25. Меркулова Н.А., Инюшкин А.Н., Беляков В.И. *Дыхательный центр и регуляция его деятельности супрабулбарными структурами*. Самара: Самарский университет; 2007.
26. Сафонов В.А., Тарасова Н.А. Структурно-функциональная организация дыхательного центра. *Физиология человека*. 2006; 1: 118–31.
27. Сафонов В.А., Миняев В.И., Полунин И.Н. *Дыхание*. М.; 2000.
28. Сегизбаева М.О., Александрова Н.П. Применение индекса «напряжение – время» для оценки функционального состояния инспираторных мышц. *Ульяновский медико-биологический журнал*. 2014; 2: 78–84.
29. Черешнев В.А., Бяловский Ю.Ю., Булатецкий С.В., Давыдов В.В. Иммунологические показатели человека в условиях действия увеличенного сопротивления дыханию. *Вестник Уральской медицинской академической науки*. 2018; 15 (4): 555–8.
30. Сегизбаева М.О., Александрова Н.П. Оценка устойчивости разных групп инспираторных мышц к утомлению при физической нагрузке на фоне моделируемой обструкции дыхательных путей. *Физиология человека*. 2014; 40 (6): 114–22.

## References

1. Chashchin V.P., Nikanov A.N., Anfalova G.L. Analysis of the effectiveness of personal respiratory protection from dust in mica processing plants. *Ekologiya cheloveka [Human Ecology]*. 2006; 4: 55–8. (in Russian)
2. Kaptsov V.A., Chirkin A.V. On the effectiveness of respiratory protective equipment as a means of preventing disease (review). *Toksikologicheskii vestnik [Toxicological Bulletin]*. 2018; 2: 2–4. (in Russian)
3. Chudin N.V., Kiryushin V.A., Rakitina I.S. Assessment of occupational risk as a method for predicting the health status of workers employed in hazardous working conditions. *Nauka molodykh – Eruditio Juvenium [Science of the Young – Eruditio Juvenium]*. 2013; 1: 5–7. (in Russian)
4. Malashenko A.V. The multifactorial genesis of occupational pulmonary pathology in miners of uranium mines. *Meditinskaya radiologiya [Medical Radiology]*. 2010; 2: 5–8. (in Russian)
5. Golinko V.I., Naumov M.M., Chebryachko S.I., Radchuk D.I. Up to date one-time effectiveness of one-time disposable prototypical respirators for European standards. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost' [Metallurgical and Mining Industry]*. 2011; 5: 118–21. (in Russian)
6. Sorokin Yu.G. New in personal protective equipment. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti [Life Safety]*. 2006; 1: 11–7. (in Russian)
7. Romanov V.V., Rubtsov V.I., Klochkov V.N., Surovtsev N.A., Timoshenko A.I. State sanitary and epidemiological surveillance of personal protective equipment for respiratory organs at radiation hazardous facilities. *Gigiena i sanitariya [Hygiene and Sanitation, Russian journal]*. 2006; 4: 78–81. (in Russian)
8. Petryanov I.V., Koscheev V.S., Basmanov P.I. et al. *Light respirators. 2<sup>nd</sup> ed [Logkiye respiratory. 2 izd.]*. Moscow: Science; 2015. (in Russian)
9. Byalovsky Yu.Yu., Bulatetskii S.V., Kiryushin V.A., Prokhorov N.I. Human immunological parameters in the conditions of application of individual respiratory protective equipment. *Gigiena i sanitariya [Hygiene and Sanitation, Russian journal]*. 2017; 96 (8): 717–20. (in Russian)
10. Kirillov V.F. et al. On personal protective equipment for respiratory organs of workers. *Meditina truda i promyshlennaya ekologiya [Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology]*. 2013; 4: 25–6. (in Russian)
11. Alexandrova N.P. The mechanisms of compensatory reactions of the respiratory system to inspiratory resistive loads. Autoabstract of Diss. St. Petersburg; 2003. (in Russian)
12. Byalovsky Yu.Yu., Abrosimov V.N. Pneumatic dispenser for external breathing resistance. Description of the invention to the patent of the Russian Federation No. 2071790; 1997. (in Russian)
13. Shatalov E.V., Shcherbakov M.G., Baldych A.A., Drozdov S.N. Medical and technical aspects of the operation of personal protective equipment of a military man. *Voyennaya mysl' [Military thought]*. 2008; 4: 40–5. (in Russian)
14. Mironov L.A. *The use of personal protective equipment [Primeneniye sredstv individual'noy zashchity]*. Nizhny Novgorod: Biota-plus; 2009. (in Russian)
15. Borg G. Psychophysical bases of perceived exertion. *Med Sci Sports Exerc*. 1982; 14 (5): 377–5.
16. Byalovsky Yu.Yu., Bulatetskii S.V. *Physiological mechanisms person's resistive breathing [Fiziologicheskiye mekhanizmy rezistivnogo dykhaniya cheloveka]*. Voronezh: RITM Publishing House; 2018. (in Russian)
17. Byalovsky Yu.Yu. Reciprocal reactions of the body to different values of increased respiratory resistance. *Rossiyskiy mediko-biologicheskii vestnik imeni akademika I.P. Pavlova [Russian Medical and Biological Bulletin of Academician I.P. Pavlov]*. 2016; 1: 19–25. (in Russian)
18. Fahey P.J., Hyde R.W. Detection of depressed ventilatory drive in patients with obstructive pulmonary diseases. *Chest*. 1983; 84 (1): 19–26.
19. Belov A.F., Byalovsky Yu.Yu., Lapkin M.M. Information and diagnostic system for psychophysiological studies of man. Ryazan; 1990. (in Russian)
20. Suslina I.V. Improving the functional state of the respiratory muscles of athletes as a result of training with additional inelastic resistance to breathing. *Fizicheskoye vospitaniye i sportivnaya trenirovka [Physical Education and Sports Training]*. 2016; 2 (16): 63–5. (in Russian)
21. Gorbanyova E.P., Kamchatnikov A.G., Solopov I.N., Segizbaeva M.O., Alexandrova N.P. Optimization of respiratory function through training with additional resistive resistance. *Rossiyskiy fiziologicheskii zhurnal im. I.M. Sechenova [Russian physiological journal of I.M. Sechenov]*. 2011; 97 (1): 83–8. (in Russian)
22. Europäische Norm DIN EN 529: 2006 Atemschutzgeräte – Empfehlungen für Auswahl, Einsatz, Pflege und Instandhaltung – Leitfaden. Brüssel: CEN; 2006.
23. Kaptsov V.A., Chirkin A.V. On the assessment of the effectiveness of personal respiratory protection. *Bezopasnost' v tekhnosfere [Safety in Technosphere]*. 2015; 4: 5: 7–8. (in Russian)
24. Vedysova O.A., Eskov M.V., Filatova O.E. *Systematic compartmental-cluster analysis of the mechanisms of resistance of the respiratory rhythm of mammals [Sistemnyy kompartmentno-klasternyy analiz mekhanizmov ustoychivosti dykhatel'noy ritmiki mlekopitayushchikh]*. Samara: Ofort; 2005. (in Russian)
25. Merkulova N.A., Inyushkin A.N., Belyakov V.I. *The respiratory center and the regulation of its activity suprabulbar structures [Dykhatel'nyy tsentr i regulyatsiya yego deyatel'nosti suprabul'barnymi strukturami]*. Samara: Samara University Press; 2007. (in Russian)
26. Safonov V.A., Tarasova H.A. Structural and functional organization of the respiratory center. *Fiziologiya cheloveka [Human physiology]*. 2006; 1: 118–31. (in Russian)
27. Safonov V.A., Minyaev V.I., Polunin I.N. *Breath [Dykhanie]*. Moscow; 2000. (in Russian)
28. Segizbaeva M.O., Alexandrova N.P. The use of the stress-time index to assess the functional state of inspiratory muscles. *Ul'yanovskiy mediko-biologicheskii zhurnal [Ul'yanovsk Medical Biological Journal]*. 2014; 2: 78–7. (in Russian)
29. Chereshev V.A., Byalovsky Yu.Yu., Bulatetskii S.V., Davydov V.V. Immunological indicators of a person under conditions of increased resistance to breathing. *Vestnik Ural'skoy meditsinskoy akademicheskoy nauki [Bulletin of the Ural Medical Academic Science]*. 2015; 15 (4): 555–8. (in Russian)
30. Segizbaeva M.O., Alexandrova N.P. Assessment of the resistance of different groups of inspiratory muscles to fatigue during physical exertion against the background of a simulated airway obstruction. *Fiziologiya cheloveka [Human Physiology]*. 2014; 40 (6): 114–22. (in Russian)
31. Fehrenbach H., Wagner C., Wegmann M. Airway remodeling in asthma: what really matters. *Cell Tissue Res*. 2017; 367: 551–69.
32. Israel E., Reddel H.K. Severe and Difficult-to-Treat Asthma in Adults. *N Engl J Med*. 2017; 377: 965–76.
33. Shrine N., Portelli M.A., John C. Moderate-to-severe asthma in individuals of European ancestry: a genome-wide association study. *Lancet Respir Med*. 2019; 7: 20–34.