

ГИПЕРБАРИЧЕСКАЯ ОКСИГЕНАЦИЯ В КЛИНИЧЕСКОЙ И СПОРТИВНОЙ ПРАКТИКЕ**В.И. Пустовойт, Р.В. Никонов***

ФГБУ «ГНЦ Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна» ФМБА России, Москва

HYPERBARIC OXYGENATION IN CLINICAL AND SPORTS PRACTICE**V.I. Pustovoit, R.V. Nikonov***

Burnazyan Federal Medical Biophysical Center, FMBA, Moscow, Russia

E-mail: sciproduction@yandex.ru**Аннотация**

Гипербарическая оксигенация (ГБО), или оксигенобаротерапия, — это дыхание 100%-ным кислородом под давлением, превышающим 1 Ата, по медицинским показаниям. Данный метод появился как направление водолазной медицины и в настоящее время широко используется в терапевтических целях для лечения большого количества патологических состояний. Несмотря на то что первые шаги по изучению воздействия кислорода на организм человека и животных были предприняты Д. Пристли в конце XVIII столетия, внедрение в практическую медицину началось только в середине XX века. На сегодняшний день немногие клиницисты осведомлены в достаточной степени об эффективности этой процедуры.

Данный обзор литературы посвящен научно-практическим аспектам применения ГБО и перспективам его развития в клинической и спортивной медицине.

Ключевые слова: ГБО, гипербарическая оксигенация, инсульт, онкология, COVID-19.

Abstract

Hyperbaric oxygen therapy (HBOT) or oxygenbarotherapy is 100% oxygen breathing at pressures greater than 1 Ata, in case of medical indications. Initially, this technique appeared as a branch of diving medicine but currently, it is widely used for therapeutic purposes in a large number of pathological conditions. Though the first steps on studying effects of oxygen at the human body and animals were made by D. Priestley at the end of the 18th century, implementation of this technique into practical medicine began only in the middle of the 20th century. To date, not many clinicians are sufficiently aware of the effectiveness of this procedure.

This literature review is devoted to research and practical aspects of HBOT application in clinical and sports medicine and to prospects of its further development.

Key words: HBOT, hyperbaric oxygen therapy, stroke, oncology, COVID-19.

Ссылка для цитирования: Пустовойт В.И., Никонов Р.В. Гипербарическая оксигенация в клинической и спортивной практике. Кремлевская медицина. Клинический вестник. 2022; 1: 78–86.

Данный обзор литературы посвящен научно-практическим аспектам применения гипербарической оксигенации (ГБО) в различных областях медицины, рассмотрены публикации на портале PubMed и в русскоязычных источниках о применении методики при различных патологических состояниях с целью оценки перспективных направлений использования процедуры.

Анализ самых цитируемых публикаций, посвященных ГБО, за период с 2000 по 2010 г. показал, что половина исследований в этой области принадлежит ученым из США и посвящена инсультам, ранам, лучевой болезни и отравлению окисью углерода [1].

В 2016 г. состоялась X Европейская конференция по гипербарической оксигенации, которая была посвящена уточнению показаний к терапии гипербарическим кислородом Европейского комитета по гипербарической медицине [2]. По итогам данной конференции были разработаны показания для проведения ГБО с разделением на 3 группы в зависимости от необходимости проведения процедур лечения.

В первую группу вошли нозологические формы, для которых ГБО настоятельно рекомендуется как основ-

ной метод лечения: отравление монооксидом углерода, открытые переломы с массивным повреждением мягких тканей, профилактика остеонекроза после удаления зубов, остеорадионекроз нижней челюсти, радионекроз мягких тканей (лучевой цистит, проктит), декомпрессионная болезнь, газовая эмболия, анаэробные или смешанные бактериальные инфекции и внезапная глухота.

Во вторую группу включены показания, подтвержденные приемлемой доказательной базой: раны, некрозы диабетической стопы, некроз головки бедренной кости, осложнения кожных трансплантатов и кожно-мышечных лоскутов, окклюзия центральной артерии сетчатки, разможнение мягких тканей, синдром длительного сдавления без переломов, остеорадионекроз (кости, кроме нижней челюсти), радиационно-индуцированные поражения мягких тканей (кроме цистита и проктита), хирургическое вмешательство и имплантация на облученных тканях (профилактическое лечение), ишемические язвы, рефрактерный хронический остеомиелит, ожоги 2-й степени более 20% поверхности, кистозный пневматоз кишечника и нейробластома IV стадии.

Таблица 1

Режимы ГБО для лечения инсульта и его последствий

Исследование	Режим ГБО	Обследуемые	Результат
A. Hadanny и соавт. (2020)	От 40 до 60 ежедневных сеансов, 5 дней в неделю, каждый сеанс включал 90 минут дыхания 100%-ным кислородом при 2 Ата с 5-минутными воздушными перерывами каждые 20 минут	162 пациента (75,3% мужчин), средний возраст $60,75 \pm 12,91$ года	ГБО индуцировала значительное увеличение всех областей когнитивных функций ($p < 0,05$), причем 86% пациентов с инсультом достигли клинически значимого улучшения. У пациентов с геморрагическими инсультами наблюдалось более значительное улучшение скорости обработки информации после ГБО ($p < 0,05$). ГБО способствует значительному улучшению во всех когнитивных областях даже на поздней хронической стадии
R. Sankaran и соавт. (2019)	24 пациента получили 20 сеансов, а двое получили 60 сеансов ГБО 100%-ным кислородом при 2 Ата по 60 минут	24 мужчины и 30 женщин в возрасте от 20 до 57 лет с постинсультной энцефалопатией, наблюдавшихся в период с 1-го по 12-й месяц после травмы. Из них 26 получали ГБО, 28 – контрольная группа	Исследователи наблюдали значительную разницу по шкале CRS-R в пользу группы ГБО с интервалами времени 1–3 и 4–8 месяцев. У большего числа пациентов в группе, прошедшей ГБО, показатели расстройств сознания улучшились по сравнению с контрольной группой
H. Golan и соавт. (2020)	100%-ный кислород, 90 минут при давлении 2 Ата, 60 ежедневных сеансов	62 пациента с острым инсультом	У 24 пациентов группы ГБО произошло значительное улучшение неврологического статуса и качества жизни. Регистрируемая зона полутени ($363 \pm 20,5$ мл) у данных больных значительно уменьшилась во время процедур ГБО. В контрольной группе наблюдались 20 пациентов, не получающих ГБО (с небольшой зоной полутени $148 \pm 29,3$ мл). Динамическое наблюдение за данными больными показало незначительное уменьшение зоны полутени

Третью группу показаний составили нозологические формы, для которых ГБО является возможным, но не обязательным воздействием, не подтвержденным достаточно убедительными обоснованиями. Это черепно-мозговая травма (ЧМТ) и ее последствия, хроническое нарушение мозгового кровообращения, медиастинит после стернотомии, злокачественная форма диффузного наружного отита, острый инфаркт миокарда, пигментный ретинит и паралич лица (Белла).

По мнению Европейского комитета по ГБО, ее применение не оправдано при расстройствах аутистического спектра, плацентарной недостаточности, рассеянном склерозе, детском церебральном параличе, звоне в ушах и острой фазе инсульта [2].

Необходимо учитывать, что применение ГБО не ограничивается упомянутыми выше случаями. В настоящее время появились новые научные данные об эффективности оксигенобаротерапии в клинической и спортивной медицине, потенциально способные расширить перечень показаний к применению.

ГБО в неврологии и нейрохирургии

До сих пор инсульт остается одной из главных причин смерти и инвалидизации в мире. ГБО рассматривается как эффективная методика лечения и восстановления после нарушений мозгового кровообращения благодаря способности насыщать ишемизированные участки мозга кислородом вне зависимости от состояния регионарного кровотока, улучшать функционирование митохондрий, снижать отек и воспаление, активировать антиоксидантную защиту.

Прекодиционирование гипербарическим кислородом помогало сформировать выраженную нейропротекцию в моделях инсульта и реперфузионного повреждения у животных [3–5].

Положительную роль ГБО при восстановлении больных после инсульта показали В. Cozene и соавт. [6], улучшение нейрокогнитивных функций – А. Hadanny и соавт. [7], эффективность в терапии постинсультной депрессии – Х.Х. Liang и соавт. [8].

S. Schiavo и соавт. отмечали улучшение моторной функции верхней конечности после инсульта при назначении ГБО в сочетании с лечебной физкультурой и психотерапией [9], а R. Sankaran и соавт. продемонстрировали эффективность ГБО в лечении постишемической энцефалопатии в первые 9 месяцев от начала заболевания [10].

H. Golan и соавт. получили положительные результаты в уменьшении зоны ишемии под воздействием ГБО и разработали систему предикторов, прогнозирующих эффективность используемой методики по данным компьютерной томографии головного мозга [11].

В таблице 1 представлены режимы ГБО, используемые для лечения и профилактики последствий инсульта.

В то же время некоторые авторы делают вывод об отсутствии достоверных данных, подтверждающих благоприятное действие ГБО при остром инсульте, и, напротив, указывают на обоснованность применения процедуры при ЧМТ [12].

Еще одна группа авторов сообщает об эффективности и безопасности ГБО при лечении тяжелой ЧМТ [13]. Рандомизированное исследование с участием 88 паци-

ентов с тяжелой ЧМТ показало значимое улучшение неврологических функций с восстановлением когнитивных способностей [14].

R. Boussi-Gross и соавт. [15] в ходе рандомизированного исследования с участием 56 пациентов с последствиями ЧМТ спустя год и более отмечают, что процедуры ГБО по протоколу 40 сеансов (5 дней в неделю) по 60 минут каждый 100%-ным кислородом при 1,5 Ата способствовали значительному улучшению когнитивных функций и качества жизни.

Анализ литературы показал, что большой интерес ученых мира вызывает антиноцицептивный эффект ГБО, изучаемый на моделях животных [16–19], а также на пациентах с хроническим болевым синдромом (мигрень и кластерная боль [20], фибромиалгия [21], сложный регионарный болевой синдром и невралгия тройничного нерва) [16]. Авторы связывают антиноцицептивный эффект ГБО с высвобождением эндогенного опиоидного пептида опосредованным оксидом азота и противовоспалительным действием гипербарического кислорода.

Заслуживают внимания данные о нейропротекторном и противодегенеративном действии ГБО. В клинических [21] и экспериментальных исследованиях [22] авторы показывают, что применение оксигенотерапии останавливает апоптоз нейронов, и делают вывод о применимости данной методики в целях предупреждения прогрессирования болезни Паркинсона.

В литературе имеются данные об улучшении показателей сна у 15 пациентов, прошедших курс ГБО по различным показаниям [23], однако на основании исследования нельзя сделать вывод, что именно улучшило сон.

Применение ГБО при инфекциях мягких тканей, плохо заживающих ранах, ожогах, диабетической стопе и других хирургических проблемах

В хирургии большой интерес к методике ГБО вызван свойством избирательного насыщения участков гипоперфузии кислородом, который способствует заживлению ран, стимулирует ангиогенез и регулирует экспрессию биологически активных веществ (оксид азота, индуцируемый гипоксией фактор, интерлейкины 1, 2, 4, 6, 10, гамма-интерферон, фактор некроза опухоли). Активация биологически активных веществ увеличивает эффективность терапии незаживающих ран, инфекций мягких тканей и рефрактерного хронического остеомиелита [19, 24, 25]. Непосредственно кислород обладает прямым бактерицидным и бактериостатическим действием на некоторые микроорганизмы, а стимулируя образование активных форм кислорода, усиливает реакции иммунитета, кроме того, потенцирует антимикробное действие отдельных антибиотиков [26].

Представлены клинические доказательства эффективности ГБО при терапии язв артериальной недостаточности, диабетических язв, отсроченного лучевого поражения и хронического рефрактерного остеомиелита [27].

A.E. Gunes и соавт. на примере одной пациентки показали перспективность включения ГБО в комплексную терапию, направленную на предотвращение ампутации при диабетической стопе [28].

Другая группа авторов в контролируемом рандомизированном исследовании на 38 пациентах с синдромом диабетической стопы показала эффективность стандартного ведения ран в сочетании с ГБО в режиме 2,5 Ата в течение 120 минут; испытуемых лечили 5 дней в неделю 4 недели подряд. Исследователи доказали, что дополнительное применение ГБО достоверно ($p=0,001$) улучшает заживление ран и снижает количество ампутаций ($p=0,01$) [29]. Авторы утверждают, что говорить о положительном влиянии ГБО при лечении диабетической стопы возможно только при развитии терапевтического эффекта, достигаемого после 20 процедур [30]. Основными причинами редкого применения ГБО в терапии диабетической стопы являются низкая доступность центров гипербарической терапии и недостаточная доказательная база по этому вопросу [31]. Исследования на крысах показали, что при воздействии 2,5 Ата в течение 90 минут на протяжении 20 дней гипербарический кислород повышает чувствительность к инсулину и положительно влияет на уровень глюкозы, липопротеидов высокой плотности и инсулина крови [32]. Результаты, представленные С. Kahraman и соавт., могут послужить дополнительным аргументом в пользу внедрения ГБО в практику комплексного подхода в терапии диабетической стопы при соответствующем подтверждении полученных данных в клинико-экспериментальных исследованиях.

Анализ результатов медицинских исследований позволяет сделать вывод, что ГБО может улучшить состояние пациентов с такой редкой патологией, как кальцифицирующая уремическая артериопатия [33]. Для подтверждения эффективности также необходимо провести дополнительные стандартизированные клинические исследования.

В опытах на крысах исследователи показали снижение выраженности острого тяжелого панкреатита после ГБО благодаря регуляции апоптоза и пролиферации ацинарных клеток и лимфоцитов периферической крови [34, 35]. В литературе представлено описание клинического случая. Женщина 56 лет с тяжелым острым панкреатитом получала терапию ГБО по протоколу: 100%-ный кислород при давлении 2,5 Ата в течение 90 минут 2 раза в день в общей сложности 5 дней [36]. Отмечено улучшение состояния и лабораторных показателей.

В опытах на крысах ученые установили, что проведение ГБО на ранних стадиях термического ожога снижает боль и отек поврежденных тканей [25]. В параллельных экспериментальных исследованиях были получены аналогичные результаты, подтверждающие, что ГБО ускоряет заживление ожогов, снижает потребность в инфузионной терапии и уменьшает сроки лечения [37, 38], но для повсеместного внедрения методики необходимы дополнительные исследования.

Экспериментальное моделирование острого сепсиса на лабораторных мышцах показало лучшую выживаемость в опытной группе по сравнению с контрольной после процедур ГБО в фазу напряжения благодаря снижению системной воспалительной реакции [39].

Некоторые исследователи полагают полезным внедрение ГБО в реконструктивную хирургию и трансплантологию благодаря схожим патофизиологическим механизмам, с которыми сталкиваются транспланто-

ги и хирурги, занимающиеся незаживающими ранами и повреждениями от сдавления [38, 40]. Исследование на 54 испытуемых с гипоспадией показало значительно ($p = 0,03$) меньше случаев недостаточности трансплантата при назначении процедур ГБО по сравнению с контрольной группой [41]. Трансплантация волосяных луковиц в сочетании с ГБО-процедурами (100%-ный кислород при давлении 2,0 Ата 7 дней подряд по 60 минут) у 34 пациентов с алопецией 2–4-й степени существенно снизила частоту послеоперационного выпадения луковиц ($27,6 \pm 2,6\%$ против $69,1 \pm 2,4\%$ в контрольной группе) [41].

Мнение научного сообщества о роли ГБО в терапии некротизирующих инфекций мягких тканей окончательно не сформировано. Это связано с тем, что некоторые ученые не выявили достаточных преимуществ оксигенотерапии [43, 44]. В то же время другие авторы приводят данные об эффективности применения процедур ГБО при некротизирующей инфекции мягких тканей, особенно в самых тяжелых случаях [45, 46].

ГБО в онкологии

Смертность от онкологических заболеваний во многих странах мира вышла на первое место. В свете такой статистики любые достижения в борьбе с раком имеют огромное значение для всего человечества.

Развитие местной гипоксии рассматривается как основной маркер солидных опухолей. Гипоксические регионарные процессы обусловлены ростом, дифференциацией, метастазированием и агрессивностью опухоли, а также анаэробным внутриклеточным гликолизом, ангиогенезом и резистентностью к проводимой терапии. В обзоре публикаций по применению ГБО в онкологии при обобщении данных с 2004 по 2012 г. авторы подтвердили, что гипербарический кислород не стимулирует рост, метастазирование или рецидивы опухолей, а, напротив, подавляет рост некоторых из них, например рака молочной железы [47]. Другие исследователи пришли к выводу, что сочетание ГБО и радиотерапии значительно превосходит по эффективности одну лучевую терапию, кроме того, гипербарический кислород существенно повышает цитостатический эффект некоторых химиопрепаратов [48]. В литературе также есть данные, что ГБО повышает чувствительность клеток злокачественной глиомы к производным изотиомочевины [49]. В экспериментальном исследовании на модели рака легкого у лабораторных мышей исследователи продемонстрировали, что ГБО подавляет рост и стимулирует апоптоз клеток опухоли за счет модификации ее гипоксического микроокружения [50].

N. Oscarsson и соавт. с целью снижения частых и мучительных последствий лучевого цистита провели рандомизированное контролируемое исследование с участием 223 пациентов. Доказана эффективность в плане снижения выраженности симптоматики позднего лучевого цистита при проведении 30–40 процедур ГБО в режиме: 100%-ный кислород под давлением 2,4–2,5 Ата с экспозицией 80–90 минут ежедневно [51]. Описанный результат был подтвержден другими исследователями на 79 пациентах [52], в результате чего авторы пришли к выводу о целесообразности раннего проведения процедур ГБО [51–53].

ГБО в оториноларингологии

В иностранном обзоре, посвященном терапии газами кохлеарных заболеваний, подчеркивается эффективность ГБО при идиопатической внезапной нейросенсорной тугоухости и острой акустической травме благодаря антигипоксическому и противовоспалительному действию [54].

По данным ретроспективного исследования процессов восстановления слуха в диапазоне высоких частот ($p = 0,01$) и клинического исхода в целом ($p = 0,005$) с 2012 по 2017 г. А.В. Ваюнту и соавт. определили, что сочетание ГБО и глюкокортикостероидов превосходит результаты применения одних стероидных гормонов [55]. Анализ результатов лечения 108 пациентов с острой акустической травмой показал необходимость применения ГБО при отсутствии восстановления слуха после 7-дневной терапии глюкокортикостероидами [56].

В эксперименте при развитии у лабораторных животных цисплатин-индуцированной ототоксичности авторы показали эффективность процедур ГБО с целью профилактики клинической симптоматики [57].

Имеются многочисленные данные о клинической эффективности ГБО при идиопатической внезапной нейросенсорной тугоухости [58–65]. Эта методика применялась также в качестве адьювантной терапии в сочетании с глюкокортикостероидами, вводимыми транстимпанально и/или системно. С целью повышения эффективности пациенты получали кислород под давлением 2–2,5 Ата, так как давление менее 1,4 Ата или более 2,5 Ата уступает по результатам воздействия. Для 10- и 20-дневного курса лечения длительность одного сеанса составляет 90 минут (10 минут компрессии, три 20-минутных периода дыхания чистым кислородом с двумя 5-минутными воздушными перерывами и 10 минут декомпрессии) и 60 минут (два 20-минутных периода дыхания чистым кислородом) соответственно. Данные процедуры рекомендуется проводить ежедневно в одно и то же время совместно с фармакологической терапией [65].

Использование методики ГБО в других областях клинической медицины

Гипербарическая оксигенация широко применяется при различных отравлениях газами, в частности, она является основной терапией при отравлении монооксидом углерода. С.С. Yang и соавт. показали, что развитие отсроченной энцефалопатии в 1,9 раза выше ($p < 0,001$) при проведении процедур ГБО по сравнению с нормобарической терапией кислородом [66]. Однако не следует делать вывод об опасности ГБО при отравлении монооксидом углерода, так как исход в значительной степени зависит от тяжести заболевания и сопутствующей патологии. Весьма вероятно, что для лечения более тяжелых форм отравления чаще применялась ГБО, что не было учтено при формировании выборки. Так, другая группа авторов отметила положительную роль методики ГБО у пациентов с отсроченной энцефалопатией при отравлении монооксидом углерода. После окончания процедур наблюдалось улучшение когнитивных функций благодаря мобилизации циркулирующих стволовых клеток, оптимизации процессов регуляции уровня мозгового нейротрофического фактора и противовоспалительного действия [67].

Данные о применении ГБО в кардиологии немногочисленны и характеризуются низкой доказательностью. В экспериментальном исследовании на лабораторных животных группа авторов показала положительное влияние ГБО на выраженность окислительного стресса и уровень воспаления при остром брыжеечном синдроме ишемии-реперфузии у крыс [68]. Другие исследователи после 60 сеансов ГБО определили значимое ($p = 0,03$) улучшение индекса работоспособности миокарда левого желудочка и многих других показателей в клинико-лабораторном исследовании 31 пациента с хронической сердечно-сосудистой патологией [69].

На данный момент представляется перспективным применение методики ГБО при остром коронарном синдроме и других видах ишемии миокарда, однако в связи с недостаточностью доказательности в исследованиях пока нет оснований рекомендовать оксигенотерапию как рутинную процедуру [70].

Представляют большой интерес преоксигенирование стволовых клеток гипербарическим кислородом перед трансплантацией [5] и стимуляция эндогенных стволовых клеток [5, 71, 72].

Оксигенотерапия в спортивной медицине

В спорте высших достижений одним из первых показаний к ГБО послужила газовая эмболия, часто встречающаяся среди спортивных и рекреационных дайверов [2, 73]. До настоящего времени альтернативы оксигенотерапии при этой нозологии не найдено.

Свою высокую эффективность ГБО продемонстрировала и в отношении высотной болезни спортсменов-альпинистов [74, 75], также в литературе имеются сообщения об успешном восстановлении функции кисти альпиниста после обморожения [76].

Ведущей из рутинных проблем спортивной медицины является восстановление спортсменов после травм. Учитывая, что оксигенотерапия характеризуется противовоспалительным эффектом, исследователи используют данную методику как терапию, направленную на процессы восстановления после мышечных травм.

В результате клинических исследований травмы четырехглавой мышцы бедра авторами были получены данные, характеризующиеся лучшим восстановлением эксцентрического момента мышц, снижением отечности и выраженности болевых ощущений после ГБО [77, 78]. Однако другие исследователи получили обратные результаты в ситуации применения ГБО на 21 студенте после мышечной травмы [79, 80].

Еще одна группа авторов в исследовании на спортсменах показала, что после интенсивных физических тренировок при сравнении с контролем отмечается достоверное ($p < 0,05$) улучшение показателей изометрического пикового крутящего момента и уменьшение болевых ощущений в результате терапии ГБО. Был сделан вывод, что оксигенотерапия в сочетании с физиотерапевтическими и восстановительными методиками ускоряет восстановление после спортивных травм и снижает затраты на лечение [81, 82]. В настоящее время установлено, что пяти сеансов ГБО недостаточно для ускорения восстановительных процессов после мышечных повреждений [83], а ведущую роль в определении эффективности гипербарической кислородотерапии играет локализация травмы. То есть

зоны повреждения с пониженной перфузией больше выигрывают от оксигенотерапии [84]. Положительный эффект от процедур ГБО при лечении заболеваний опорно-двигательного аппарата у спортсменов получили F. Drobnič и соавт., но вопрос внедрения метода в обычную практику оставили для будущих исследований [85]. В нерандомизированном исследовании на 32 профессиональных и полупрофессиональных игроках в регби с травмой медиальной коллатеральной связки коленного сустава 2-й степени продемонстрировано, что ГБО способствует уменьшению боли и ускоряет возвращение спортсменов к игре, улучшая процесс заживления благодаря стимулированию активности фибробластов и снижению воспаления [86].

Рандомизированное исследование на 41 элитном спортсмене с мышечными травмами, связанными с физическими упражнениями, после 10 сеансов ГБО показало снижение концентрации маркеров крови, характеризующих повреждение мышц, что косвенно указывает на ускорение процессов восстановления мышечных повреждений на фоне оксигенотерапии [87]. Сходные данные были получены в исследовании на 18 здоровых мужчинах [88]. В таблице 2 представлены режимы ГБО, применявшиеся исследователями для ускорения процессов восстановления спортсменов после мышечных травм в результате физических упражнений.

Предпринимаются попытки повышения физической работоспособности и функциональных резервов организма спортсменов. Некоторые авторы попытались использовать процедуры ГБО для повышения эффективности выполнения высокоинтенсивных тренировочных нагрузок, что привело к отрицательному результату [89, 90]. Однако ГБО зарекомендовала себя как перспективная методика, ускоряющая процессы восстановления между интенсивными тренировками [91]. Так, исследователи, широко применявшие ГБО в период Олимпийских игр в Нагано, сообщили об успешном опыте проведения процедур ГБО для восстановления атлетов между выступлениями [92].

Необходимо отметить, что при изучении влияния процедур ГБО на организм спортсменов многие исследования в этой области проводились не на атлетах, а в качестве плацебо применялся гипербарический воздух, который обладает самостоятельным биологическим действием [93], что снизило достоверность полученных результатов. Данные недостатки свидетельствуют о необходимости проведения дополнительных исследований, отвечающих требованиям доказательной медицины.

ГБО в терапии COVID-19

В 2019 г. человечество столкнулось с опаснейшей угрозой, унесшей более 4,5 млн жизней и ставшей одним из самых серьезных вызовов здравоохранению. В связи с преимущественным поражением легких при тяжелой форме заболевания перед научным сообществом встал вопрос об улучшении доставки кислорода в организм в условиях исключения из функционирования значительной доли легочной ткани. Гипербарическая оксигенация предоставила возможность эффективно решать проблему гипоксемии и предотвращать перевод пациентов на вызывающую осложнения искусст-

Таблица 2

Режимы гипербарической кислородотерапии, применяющиеся для восстановления спортсменов после мышечных повреждений

Исследование	Режим ГБО	Обследуемые	Результат
J.R. Staples и соавт. (1999)	100%-ный кислород в течение 60 минут 1 раз день при давлении 2,0 Ата ежедневно 5 дней	66 мужчин-физкультурников, возраст 18–35 лет	ГБО улучшила восстановление эксцентрического момента четырехглавой мышцы
B.C. Harrison и соавт. (2001)	100%-ный кислород при давлении 2,5 Ата в течение 100 минут с воздушным перерывом на 5 минут 1 раз в день ежедневно 4 дня	21 мужчина, возраст 18–25 лет	Отсутствует эффективность в ответ на проводимые процедуры ГБО в восстановительном лечении
A.L. Webster и соавт. (2002)	100%-ный кислород при давлении 2,5 Ата в течение 60 минут 1 раз в день ежедневно 6 дней	12 здоровых студентов мужского пола, возраст $24,2 \pm 3,2$ года	Процедуры ГБО улучшили изометрический пиковый крутящий момент, снизили болевые и неприятные ощущения
G. Germain и соавт. (2003)	95%-ный кислород при давлении 2,5 Ата в течение 100 минут 1 раз в день ежедневно 5 дней	6 мужчин и 10 женщин, возраст 18–25 лет	Пять процедур ГБО не ускорили восстановительное лечение
C.Y. Chen и соавт. (2019)	100%-ный кислород при давлении 2,5 Ата в течение 60 минут 1 раз в день ежедневно 10 дней	41 спортсмен элитного уровня	ГБО способствовала быстрому восстановлению мышц после травмы
J. Woo и соавт. (2020)	100%-ный кислород при давлении 2,5 Ата в течение 60 минут 1 раз в день ежедневно 6 дней	18 здоровых мужчин, возраст 18–27 лет	В группе ГБО воспаление мышц было менее выражено, чем в контрольной

венную вентиляцию легких [94, 95]. В данном случае процедуры ГБО не вызывают усиления окислительного стресса [96] и безопасны для пациентов с SARS-CoV-2 [97]. Исследования в этой области продолжаются [98, 99].

Заключение

Применение процедур ГБО в современной медицине является перспективным направлением при лечении и восстановлении пациентов. Ключевыми направлениями развития ГБО представляются расширение перечня основных показаний, повышение эффективности процедур, нивелирование повреждающего действия активных форм кислорода (снижение токсического воздействия на центральную нервную систему, легкие и глаза) путем оптимизации режимов оксигенобаротерапии, усовершенствования средств дыхания кислородом, применения антиоксидантов [100, 101].

Для устранения психологического и эмоционального напряжения у пациентов в период пребывания в барокамере целесообразно повысить комфортность за счет использования очков виртуальной реальности и других мультимедийных развлечений [102]. В интересах оценки эффективности проводимых процедур и прогнозирования возможных отклонений в состоянии здоровья необходимы новые технические решения для динамического мониторинга самочувствия пациентов во время сеанса [103].

Выводы

1. Применение ГБО патогенетически оправдано при многих состояниях, в основе которых лежат гипоксия, воспаление, анаэробная инфекция или аутоиммунная агрессия.

2. Для обоснованного внедрения в медицинскую практику новых показаний и способов проведения процедур оксигенобаротерапии необходимо проведение дополнительных валидных исследований.

Литература

1. Lee C.H., Lee L., Yang K.J., Lin T.F. Top-cited articles on hyperbaric oxygen therapy published from 2000 to 2010 // *Undersea Hyperb Med.* – 2012. – V. 39. – № 6. – P. 1089–1098.
2. Mathieu D., Marroni A., Kot J. Tenth European Consensus Conference on Hyperbaric Medicine: recommendations for accepted and non-accepted clinical indications and practice of hyperbaric oxygen treatment // *Diving Hyperb Med.* – 2017. – V. 47. – № 1. – P. 24–32.
3. Zeng Y., Xie K., Dong H. et al. Hyperbaric oxygen preconditioning protects cortical neurons against oxygen-glucose deprivation injury: role of peroxisome proliferator-activated receptor-gamma // *Brain Res.* – 2012. – V. 3. – № 1452. – P. 140–150.
4. Hentia C., Rizzato A., Camporesi E. et al. An overview of protective strategies against ischemia/reperfusion injury: the role of hyperbaric oxygen preconditioning // *Brain Behav.* – 2018. – V. 30. – № 8. – P. 5.
5. Cozzen B., Sadanandan N., Gonzales-Portillo B. et al. An extra breath of fresh air: hyperbaric oxygenation as a stroke therapeutic // *Biomolecules.* – 2020. – V. 10. – № 9. – P. 1279.
6. Hadanny A., Suzin G., Lang E., Efrati S. Hyperbaric oxygen therapy – basics and new applications // *Harefuah.* – 2018. – V. 157. – № 5. – P. 322–326.
7. Hadanny A., Rittblat M., Bitterman M. et al. Hyperbaric oxygen therapy improves neurocognitive functions of post-stroke patients – a retrospective analysis // *Restor Neurol Neurosci.* – 2020. – V. 38. – № 1. – P. 93–107.
8. Liang X.X., Hao Y.G., Duan X.M. et al. Hyperbaric oxygen therapy for post-stroke depression: a systematic review and meta-analysis // *Clin Neurol Neurosurg.* – 2020. – V. 195. – P. 105910.
9. Schiavo S., Richardson D., Santa Mina D. et al. Hyperbaric oxygen and focused rehabilitation program: a feasibility study in improving upper limb motor function after stroke // *Appl Physiol Nutr Metab.* – 2020. – V. 45. – № 12. – P. 1345–1352.

10. Sankaran R., Radhakrishnan K., Sundaram K.R. Hyperbaric oxygen therapy in patients with hypoxic ischemic encephalopathy // *Neurol India*. – 2019. – V. 67. – № 3. – P. 728–731.
11. Golan H., Makogon B., Volkov O. et al. Imaging-based predictors for hyperbaric oxygen therapy outcome in post-stroke patients. Report 1 // *Med Hypotheses*. – 2020. – V. 136. – P. 109510.
12. Deng Z., Chen W., Jin J. et al. The neuroprotection effect of oxygen therapy: a systematic review and meta-analysis // *Niger J Clin Pract*. – 2018. – V. 21. – № 4. – P. 401–416.
13. Daly S., Thorpe M., Rockswold S. et al. Hyperbaric oxygen therapy in the treatment of acute severe traumatic brain injury: a systematic review // *J Neurotrauma*. – 2018. – V. 35. – № 4. – P. 623–629.
14. Zhong X., Shan A., Xu J. et al. Hyperbaric oxygen for severe traumatic brain injury: a randomized trial // *J Int Med Res*. – 2020. – V. 48. – № 10. – P. 300060520939824.
15. Boussi-Gross R., Golan H., Fishlev G. et al. Hyperbaric oxygen therapy can improve post-concussion syndrome years after mild traumatic brain injury – a randomized prospective trial // *PLoS One*. – 2013. – V. 8. – № 11. – P. e79995.
16. Sutherland A.M., Clarke H.A., Katz J., Katznelson R. Hyperbaric oxygen therapy: a new treatment for chronic pain? // *Pain Pract*. – 2016. – V. 16. – № 5. – P. 620–628.
17. Zelinski L.M., Ohgami Y., Chung E. et al. A prolonged nitric oxide-dependent, opioid-mediated antinociceptive effect of hyperbaric oxygen in mice // *J Pain*. – 2009. – V. 10. – № 2. – P. 167–172.
18. Chung E., Zelinski L.M., Ohgami Y. et al. Hyperbaric oxygen treatment induces a 2-phase antinociceptive response of unusually long duration in mice // *J Pain*. – 2010. – V. 11. – № 9. – P. 847–853.
19. Hui J., Zhang Z.J., Zhang X. et al. Repetitive hyperbaric oxygen treatment attenuates complete Freund's adjuvant-induced pain and reduces glia-mediated neuroinflammation in the spinal cord // *J Pain*. – 2013. – V. 14. – № 7. – P. 747–758.
20. Bennett M.H., French C., Schnabel A. et al. Normobaric and hyperbaric oxygen therapy for the treatment and prevention of migraine and cluster headache // *Cochrane Database Syst Rev*. – 2015. – V. 28. – № 12. – CD005219.
21. Atzeni F., Masala I.F., Cirillo M. et al. Hyperbaric oxygen therapy in fibromyalgia and the diseases involving the central nervous system // *Clin Exp Rheumatol*. – 2020. – V. 38. – Suppl. 123. – № 1. – P. 94–98.
22. Kusuda Y., Takemura A., Nakano M., Ishihara A. Mild hyperbaric oxygen inhibits the decrease of dopaminergic neurons in the substantia nigra of mice with MPTP-induced Parkinson's disease // *Neurosci Res*. – 2018. – V. 132. – P. 58–62.
23. Uezato A., Enomoto M., Tamaoka M. et al. Shorter sleep onset latency in patients undergoing hyperbaric oxygen treatment // *Psychiatry Clin Neurosci*. – 2017. – V. 71. – № 1. – P. 73–74.
24. Hyldegaard O., Hedetoft M. Hyperbaric oxygen therapy // *Ugeskr Laeger*. – 2020. – V. 182. – № 44. – P. V06200463.
25. Wu Z.S., Lo J.J., Wu S.H. et al. Early hyperbaric oxygen treatment attenuates burn-induced neuroinflammation by inhibiting the galectin-3-dependent toll-like receptor-4 pathway in a rat model // *Int J Mol Sci*. – 2018. – V. 19. – № 8. – P. 2195.
26. Memar M.Y., Yekani M., Alizadeh N., Baghi H.B. Hyperbaric oxygen therapy: antimicrobial mechanisms and clinical application for infections // *Biomed Pharmacother*. – 2019. – V. 109. – P. 440–447.
27. Lam G., Fontaine R., Ross F.L., Chiu E.S. Hyperbaric oxygen therapy: exploring the clinical evidence // *Adv Skin Wound Care*. – 2017. – V. 30. – № 4. – P. 181–190.
28. Gunes A.E., Cimsit M. Can amputation be prevented in diabetic foot? Interdisciplinary approach to diabetic foot: a case report // *Undersea Hyperb Med*. – 2017. – V. 44. – № 2. – P. 157–160.
29. Chen C.Y., Wu R.W., Hsu M.C. et al. Adjunctive hyperbaric oxygen therapy for healing of chronic diabetic foot ulcers: a randomized controlled trial // *J Wound Ostomy Continence Nurs*. – 2017. – V. 44. – № 6. – P. 536–545.
30. Bolton L. Does hyperbaric oxygen improve lower extremity ulcer outcomes? // *Wounds*. – 2020. – V. 32. – № 10. – P. 291–293.
31. Henshaw F.R., Brennan L., MacMillan F. Perceptions of hyperbaric oxygen therapy among podiatrists practicing in high-risk foot clinics // *Int Wound J*. – 2018. – V. 15. – № 3. – P. 375–382.
32. Kahraman C., Yaman H. Hyperbaric oxygen therapy affects insulin sensitivity/resistance by increasing adiponectin, resistin, and plasminogen activator inhibitor-1 in rats // *Turk J Med Sci*. – 2021. – V. 51. – № 3. – P. 1572–1578.
33. Charaghvandi D.A., Teguh D.N., van Hulst R.A. Hyperbaric oxygen therapy in patients suffering from wounds in calciphylaxis: a narrative review // *Undersea Hyperb Med*. – 2020. – V. 47. – № 1. – P. 111–123.
34. Koh S.L., Tan J.W., Muralidharan V., Christophi C. The effect of hyperbaric oxygen on apoptosis and proliferation in severe acute pancreatitis // *HPB (Oxford)*. – 2009. – V. 11. – № 8. – P. 629–637.
35. Bai X., Song Z., Zhou Y. et al. The apoptosis of peripheral blood lymphocytes promoted by hyperbaric oxygen treatment contributes to attenuate the severity of early stage acute pancreatitis in rats // *Apoptosis*. – 2014. – V. 19. – № 1. – P. 58–75.
36. Christophi C., Millar I., Nikfarjam M. et al. Hyperbaric oxygen therapy for severe acute pancreatitis // *J Gastroenterol Hepatol*. – 2007. – V. 22. – № 11. – P. 2042–2046.
37. Weitgasser L., Ihra G., Schäfer B. et al. Update on hyperbaric oxygen therapy in burn treatment // *Wien Klin Wochenschr*. – 2021. – V. 133. – № 3–4. – P. 137–143.
38. Edwards M., Singh M., Selesny S., Cooper J.S. Hyperbaric treatment of thermal burns // *StatPearls [Internet]*. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2021.
39. Halbach J.L., Prieto J.M., Wang A.W. et al. Early hyperbaric oxygen therapy improves survival in a model of severe sepsis // *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*. – 2019. – V. 317. – № 1. – P. 160–168.
40. Harl M.J. Defining the role of hyperbaric oxygen therapy as an adjunct to reconstructive surgery // *Surg Clin North Am*. – 2020. – V. 100. – № 4. – P. 777–785.
41. Bush N., Snodgrass W. Hyperbaric oxygen therapy improves oral graft take in hypospadias staged tubularized autograft reoperations // *J Urol*. – 2019. – V. 202. – № 3. – P. 617–622.
42. Fan Z.X., Gan Y., Qu Q. et al. The effect of hyperbaric oxygen therapy combined with hair transplantation surgery for the treatment of alopecia // *J Cosmet Dermatol*. – 2021. – V. 20. – № 3. – P. 917–921.
43. Willy C., Rieger H., Vogt D. Hyperbare oxygenation bei nekrotisieren den Weichteilinfektionen: Kontra // *Chirurg*. – 2012. – V. 83. – № 11. – P. 960–972.

44. Levett D., Bennett M.H., Millar I. Adjunctive hyperbaric oxygen for necrotizing fasciitis // *Cochrane Database Syst Rev.* – 2015. – V. 1. – № 1. – CD007937.
45. Schmale M., Fichtner A., Pohl C. et al. Hyperbare oxygenation bei nekrotisierenden Weichteilinfektionen: Pro // *Chirurg.* – 2012. – V. 83. – № 11. – P. 973–979.
46. Shaw J.J., Psoinos C., Emhoff T.A. et al. Not just full of hot air: hyperbaric oxygen therapy increases survival in cases of necrotizing soft tissue infections // *Surg Infect (Larchmt).* – 2014. – V. 15. – № 3. – P. 328–335.
47. Moen I., Stuhr L.E. Hyperbaric oxygen therapy and cancer – a review // *Target Oncol.* – 2012. – V. 7. – № 4. – P. 233–242.
48. Stępień K., Ostrowski R.P., Matyja E. Hyperbaric oxygen as an adjunctive therapy in treatment of malignancies, including brain tumours // *Med Oncol.* – 2016. – V. 33. – № 9. – P. 101.
49. Zembrzuska K., Ostrowski R.P., Matyja E. Hyperbaric oxygen increases glioma cell sensitivity to antitumor treatment with a novel isothiourea derivative in vitro // *Oncol Rep.* – 2019. – V. 41. – № 5. – P. 2703–2716.
50. Chen S.Y., Tsuneyama K., Yen M.H. et al. Hyperbaric oxygen suppressed tumor progression through the improvement of tumor hypoxia and induction of tumor apoptosis in A549-cell-transferred lung cancer // *Sci Rep.* – 2021. – V. 11. – № 1. – P. 12033.
51. Oscarsson N., Müller B., Rosén A. et al. Radiation-induced cystitis treated with hyperbaric oxygen therapy (RICH-ART): a randomised, controlled, phase 2–3 trial // *Lancet Oncol.* – 2019. – V. 20. – № 11. – P. 1602–1614.
52. Feldmeier J.J. Hyperbaric oxygen for radiation cystitis // *Lancet Oncol.* – 2019. – V. 20. – № 11. – P. 1481–1482.
53. Clarke R. Radiation-induced cystitis and hyperbaric oxygen therapy // *Lancet Oncol.* – 2019. – V. 20. – № 12. – P. e660.
54. Buckley J.C. Use of gases to treat cochlear conditions // *Front Cell Neurosci.* – 2019. – V. 24. – № 13. – P. 155.
55. Bayoumy A.B., van der Veen E.L., van Ooij P.A.M. et al. Effect of hyperbaric oxygen therapy and corticosteroid therapy in military personnel with acute acoustic trauma // *BMJ Mil Health.* – 2020. – V. 166. – № 4. – P. 243–248.
56. Holy R., Zavazalova S., Prochazkova K. et al. The use of hyperbaric oxygen therapy and corticosteroid therapy in acute acoustic trauma: 15 years' experience at the Czech military health service // *Int J Environ Res Public Health.* – 2021. – V. 18. – № 9. – P. 4460.
57. Cobanoglu H.B., Vuralkan E., Arslan A. et al. Is hyperbaric oxygen therapy effective in cisplatin-induced ototoxicity in rats? // *Clin Exp Otorhinolaryngol.* – 2019. – V. 12. – № 1. – P. 66–71.
58. Ajduk J., Ries M., Trotic R. et al. Hyperbaric oxygen therapy as salvage therapy for sudden sensorineural hearing loss // *J Int Adv Otol.* – 2017. – V. 13. – № 1. – P. 61–64.
59. Cho I., Lee H.M., Choi S.W. et al. Comparison of two different treatment protocols using systemic and intratympanic steroids with and without hyperbaric oxygen therapy in patients with severe to profound idiopathic sudden sensorineural hearing loss: a randomized controlled trial // *Audiol Neurootol.* – 2018. – V. 23. – № 4. – P. 199–207.
60. Stachler R.J., Chandrasekhar S.S., Archer S.M. et al. Clinical practice guideline: sudden hearing loss // *Otolaryngol Head Neck Surg.* – 2012. – V. 146. – № 3. – P. 1–35.
61. Bagli B.S. Clinical efficacy of hyperbaric oxygen therapy on idiopathic sudden sensorineural hearing loss // *Undersea Hyperb Med.* – 2020. – V. 47. – № 1. – P. 51–56.
62. Murphy-Lavoie H., Piper S., Moon R.E., Legros T. Hyperbaric oxygen therapy for idiopathic sudden sensorineural hearing loss // *Undersea Hyperb Med.* – 2012. – V. 39. – № 3. – P. 777–792.
63. Van der Wal A.W., van Ooij P.J.A.M., de Ru J.A. Hyperbaric oxygen therapy for sudden sensorineural hearing loss in divers // *J Laryngol Otol.* – 2016. – V. 130. – № 11. – P. 1039–1047.
64. Hu Y., Chen H., Xiong J., Sun W. The efficacy of hyperbaric oxygen in the treatment of sudden sensorineural hearing loss // *Lin Chung Er Bi Yan Hou Tou Jing Wai Ke Za Zhi.* – 2020. – V. 34. – № 6. – P. 521–523; 527.
65. Olex-Zarychta D. Hyperbaric oxygenation as adjunctive therapy in the treatment of sudden sensorineural hearing loss // *Int J Mol Sci.* – 2020. – V. 21. – № 22. – P. 8588.
66. Yang C.C., Chuang Y.F., Chen P.E. et al. The occurrence of delayed neuropsychologic sequelae in acute carbon monoxide poisoning patients after treatment with hyperbaric or normobaric oxygen therapy // *Medicine (Baltimore).* – 2021. – V. 100. – № 2. – P. e24183.
67. Zhang L., Sun Q., Xin Q. et al. Hyperbaric oxygen therapy mobilized circulating stem cells and improved delayed encephalopathy after acute carbon monoxide poisoning with up-regulation of brain-derived neurotrophic factor // *Am J Emerg Med.* – 2021. – V. 42. – P. 95–100.
68. Açıkşari K., Eğin S., Hepgül G. et al. Protective effect of hyperbaric oxygen treatment on rat intestinal mucosa after mesenteric ischaemia and reperfusion // *Diving Hyperb Med.* – 2019. – V. 49. – № 4. – P. 253–258.
69. Leitman M., Efrati S., Fuchs S. et al. The effect of hyperbaric oxygenation therapy on myocardial function // *Int J Cardiovasc Imaging.* – 2020. – V. 36. – № 5. – P. 833–840.
70. Bennett M.H., Lehm J.P., Jepson N. Hyperbaric oxygen therapy for acute coronary syndrome // *Cochrane Database Syst Rev.* – 2015. – V. 2015. – № 7. – CD004818.
71. Gardin C., Bosco G., Ferroni L. et al. Hyperbaric oxygen therapy improves the osteogenic and vasculogenic properties of mesenchymal stem cells in the presence of inflammation in vitro // *Int J Mol Sci.* – 2020. – V. 21. – № 4. – P. 1452.
72. Fosen K.M., Thom S.R. Hyperbaric oxygen, vasculogenic stem cells, and wound healing // *Antioxid Redox Signal.* – 2014. – V. 21. – № 11. – P. 1634–1647.
73. Kirby J.P. The diagnosis of decompression sickness in sport divers // *Mo Med.* – 2019. – V. 116. – № 3. – P. 195–197.
74. Butler G.J., Al-Waili N., Passano D.V. et al. Altitude mountain sickness among tourist populations: a review and pathophysiology supporting management with hyperbaric oxygen // *J Med Eng Technol.* – 2011. – V. 35. – № 3–4. – P. 197–207.
75. Hartman-Ksycińska A., Kluz-Zawadzka J., Lewandowski B. High altitude illness // *Przegl Epidemiol.* – 2016. – V. 70. – № 3. – P. 490–499.
76. Folio L.R., Arkin K., Butler W.P. Frostbite in a mountain climber treated with hyperbaric oxygen: case report // *Mil Med.* – 2007. – V. 172. – № 5. – P. 560–563.
77. Staples J.R., Clement D. Hyperbaric oxygen chambers and the treatment of sports injuries // *Sports Med.* – 1996. – V. 22. – № 4. – P. 219–227.
78. Staples J.R., Clement D.B., Taunton J.E., McKenzie D.C. Effects of hyperbaric oxygen on a human model of

- injury // Am J Sports Med.* – 1999. – V. 27. – № 5. – P. 600–605.
79. Mekjavic I.B., Exner J.A., Tesch P.A., Eiken O. Hyperbaric oxygen therapy does not affect recovery from delayed onset muscle soreness // *Med Sci Sports Exerc.* – 2000. – V. 32. – № 3. – P. 558–563.
80. Harrison B.C., Robinson D., Davison B.J. et al. Treatment of exercise-induced muscle injury via hyperbaric oxygen therapy // *Med Sci Sports Exerc.* – 2001. – V. 33. – № 1. – P. 36–42.
81. Webster A.L., Syrotuik D.G., Bell G.J. et al. Effects of hyperbaric oxygen on recovery from exercise-induced muscle damage in humans // *Clin J Sport Med.* – 2002. – V. 12. – № 3. – P. 139–150.
82. Dolezal V. Hyperbarická oxygenoterapie prizranění sportovců // *Cas Lek Cesk.* – 2002. – V. 141. – № 10. – P. 304–306.
83. Germain G., Delaney J., Moore G. et al. Effect of hyperbaric oxygen therapy on exercise-induced muscle soreness // *Undersea Hyperb Med.* – 2003. – V. 30. – № 2. – P. 135–145.
84. Kanhai A., Losito J.M. Hyperbaric oxygen therapy for lower-extremity soft-tissue sports injuries // *J Am Podiatr Med Assoc.* – 2003. – V. 93. – № 4. – P. 298–306.
85. Drobnic F., Turmo A. Estado actual del tratamiento con oxígeno hiperbárico de las enfermedades del aparatolocomotor en medicina del deporte // *Med Clin (Barc).* – 2010. – V. 134. – № 7. – P. 312–315.
86. Yagishita K., Enomoto M., Takazawa Y. et al. Effects of hyperbaric oxygen therapy on recovery acceleration in Japanese professional or semi-professional rugby players with grade 2 medial collateral ligament injury of the knee: a comparative non-randomized study // *Undersea Hyperb Med.* – 2019. – V. 46. – № 5. – P. 647–654.
87. Chen C.Y., Chou W.Y., Ko J.Y. et al. Early recovery of exercise-related muscular injury by HBOT // *Biomed Res Int.* – 2019. – V. 2019. – P. 6289380.
88. Woo J., Min J.H., Lee Y.H., Roh H.T. Effects of hyperbaric oxygen therapy on inflammation, oxidative/antioxidant balance, and muscle damage after acute exercise in normobaric, normoxic and hypobaric, hypoxic environments: a pilot study // *Int J Environ Res Public Health.* – 2020. – V. 17. – № 20. – P. 7377.
89. Rozenek R., Fobel B.F., Banks J.C. et al. Does hyperbaric oxygen exposure affect high-intensity, short-duration exercise performance? // *J Strength Cond Res.* – 2007. – V. 21. – № 4. – P. 1037–1041.
90. Kawada S., Fukaya K., Ohtani M. et al. Effects of pre-exposure to hyperbaric hyperoxia on high-intensity exercise performance // *J Strength Cond Res.* – 2008. – V. 22. – № 1. – P. 66–74.
91. Barnett A. Using recovery modalities between training sessions in elite athletes: does it help? // *Sports Med.* – 2006. – V. 36. – № 9. – P. 781–796.
92. Ishii Y., Deie M., Adachi N. et al. Hyperbaric oxygen as an adjuvant for athletes // *Sports Med.* – 2005. – V. 35. – № 9. – P. 739–746.
93. Figueroa X.A., Wright J.K. Clinical results in brain injury trials using HBO2 therapy: another perspective // *Undersea Hyperb Med.* – 2015. – V. 42. – № 4. – P. 333–351.
94. Самойлов А.С., Удалов Ю.Д., Шеянов М.В. и др. Опыт применения гипербарической оксигенотерапии с использованием портативных барокамер для лечения пациентов с новой коронавирусной инфекцией COVID-19 // *Биомедицина.* – 2020. – Т. 16. – № 2. – С. 39–46. [Samoilov A.S., Udalov Yu.D., Sheyanov M.V. et al. Experience of application hyperbaric oxygen therapy using portable pressure chambers for the treatment of patients with a new coronavirus infection COVID-19 // *Biomedica (Biomedicine).* – 2020. – V. 16. – № 2. – P. 39–46. In Russian].
95. Thibodeaux K., Speyrer M., Raza A. et al. Hyperbaric oxygen therapy in preventing mechanical ventilation in COVID-19 patients: a retrospective case series // *J Wound Care.* – 2020. – V. 29. – Suppl. 5a. – P. S4–S8.
96. Петриков С.С., Евсеев А.К., Левина О.А. и др. Гипербарическая оксигенация в терапии пациентов с COVID-19 // *Общая реаниматология.* – 2020. – Т. 16. – № 6. – С. 4–18. [Petrikov S.S., Evseev A.K., Levina O.A. et al. Hyperbaric oxygen therapy in patients with COVID-19 // *Obshchaya Reanimatologiya.* – 2020. – V. 16. – № 6. – P. 4–18. In Russian].
97. Gorenstein S.A., Castellano M.L., Slone E.S. et al. Hyperbaric oxygen therapy for COVID-19 patients with respiratory distress: treated cases versus propensity-matched controls // *Undersea Hyperb Med.* – 2020. – V. 47. – № 3. – P. 405–413.
98. Kjellberg A., de Maio A., Lindholm P. Can hyperbaric oxygen safely serve as an anti-inflammatory treatment for COVID-19? // *Med Hypotheses.* – 2020. – V. 144. – P. 110224.
99. Kjellberg A., Douglas J., Pawlik M.T. et al. Randomised, controlled, open label, multicentre clinical trial to explore safety and efficacy of hyperbaric oxygen for preventing ICU admission, morbidity and mortality in adult patients with COVID-19 // *BMJ Open.* – 2021. – V. 11. – № 7. – P. e046738.
100. McMonnies C.W. Hyperbaric oxygen therapy and the possibility of ocular complications or contraindications // *Clin Exp Optom.* – 2015. – V. 98. – № 2. – P. 122–125.
101. McMonnies C. Reactive oxygen species, oxidative stress, glaucoma and hyperbaric oxygen therapy // *J Optom.* – 2018. – V. 11. – № 1. – P. 3–9.
102. Пустовойт В.И., Назарян С.Е., Адоева Е.Я. и др. Пилотное исследование по оценке эффективности психокорректирующих методов с использованием ЭЭГ-тренинга и очков виртуальной реальности у спортсменов, участвующих в экстремальных видах спорта // *Спортивная медицина: наука и практика.* – 2021. – Т. 11. – № 2. – С. 67–75. [Pustovoit V.I., Nazaryan S.E., Adoeva E.Ya. et al. Pilot study on the evaluation of the effectiveness of psychocorrection methods that include EEG-training and VR headset in athletes involved in extreme kinds of sports // *Sports medicine: research and practice.* – 2021. – V. 11. – № 2. – P. 67–75. In Russian].
103. Самойлов А.С., Никонов Р.В., Пустовойт В.И., Ключников М.С. Применение методики анализа вариабельности сердечного ритма для определения индивидуальной устойчивости к токсическому действию кислорода // *Спортивная медицина: наука и практика.* – 2020. – Т. 10. – № 3. – С. 73–80. [Samoilov A.S., Nikonov R.V., Pustovoit V.I., Klyuchnikov M.S. Using heartrate variability to determine individual resistance to the hyperbaric oxygen toxicity // *Sports medicine: research and practice.* – 2020. – V. 10. – № 3. – P. 73–80. In Russian].