

ISSN 2949-5873 (print)
ISSN 2949-5881 (online)

Реабилитология

2025 | Том 3 | № 1

<https://rehabilitology.com>



2025 | Vol 3 | No 1

Journal of Medical
Rehabilitation

Область применения, механизмы действия и эффективность гипербарической оксигенации в восстановительной медицине

Н.Ф. Мирютова¹, Д.А. Груздева²

¹ Томский научно-исследовательский институт курортологии и физиотерапии – филиал федерального государственного бюджетного учреждения «Федеральный научно-клинический центр медицинской реабилитации и курортологии Федерального медико-биологического агентства» (ул. Розы Люксембург, д. 1, Томск 634009, Российская Федерация)

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова» Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет) (ул. Трубецкая, д. 8/2, Москва 119048, Российская Федерация)

Для контактов: Наталья Федоровна Мирютова, e-mail: mirut@sibmail.com

РЕЗЮМЕ

Современная медицина продвинулась достаточно далеко в вопросах лечения нозологий, ранее считавшихся неизлечимыми. Теперь перед научным сообществом стоит более сложная задача – восстановление утраченного здоровья пациента. Одной из медицинских технологий, позволяющих приблизиться к решению этой проблемы, является гипербарическая оксигенация. Этот метод достаточно давно используют в медицине, за ним закреплена репутация одного из эффективных средств лечения и восстановления пациентов в составе комплексной терапии. В обзоре литературы представлены отдельные исторические аспекты его разработки и внедрения, механизмы реализации лечебного действия, оборудование, а также обновленные данные о показаниях, противопоказаниях, безопасности и эффективности применения гипербарической оксигенации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

реабилитация, восстановительная медицина, гипербарическая оксигенация, механизм действия, эффективность

Для цитирования

Мирютова Н.Ф., Груздева Д.А. Область применения, механизмы действия и эффективность гипербарической оксигенации в восстановительной медицине. *Реабилитология*. 2025; 3 (1): 36–50. <https://doi.org/10.17749/2949-5873/rehabil.2025.38>.

Hyperbaric oxygenation in rehabilitation medicine: application, action mechanisms, and effectiveness

N.F. Miryutova¹, D.A. Gruzdeva²

¹ Tomsk Research Institute of Balneology and Physiotherapy – Branch of Federal Scientific and Clinical Center for Medical Rehabilitation and Balneology of the Federal Medical and Biological Agency (1 Roza Luxemburg Str., Tomsk 634009, Russian Federation)

² Sechenov University (8/2 Trubetskaya Str., Moscow 119048, Russian Federation)

Corresponding author: Natalia F. Miryutova, e-mail: mirut@sibmail.com

ABSTRACT

Modern medicine has achieved substantial progress in the treatment of diseases previously considered incurable. In this regard, a serious problem is posed for academia, i.e., to restore patients' lost health. One of the medical technologies contributing to a possible solution to this problem is hyperbaric oxygenation. This treatment method has been used in medicine for a long time and is considered one of the most effective means for patients' treatment and rehabilitation within complex therapy. The literature review presents historical aspects of the development and implementation of hyperbaric oxygenation, mechanisms of its therapeutic effect, and the equipment it needs as well as provides updated data on its indications, contraindications, safety, and effectiveness.

KEYWORDS

rehabilitation, restorative medicine, hyperbaric oxygenation, action mechanisms, effectiveness

For citation

Miryutova N.F., Gruzdeva D.A. Hyperbaric oxygenation in rehabilitation medicine: application, action mechanism, and effectiveness. *Reabilitologia / Journal of Medical Rehabilitation*. 2025; 3 (1): 36–50 (in Russ.). <https://doi.org/10.17749/2949-5873/rehabil.2025.38>.

ВВЕДЕНИЕ / INTRODUCTION

Современные достижения в области фундаментальной медицины и здравоохранения позволили справиться с болезнями, которые ранее не поддавались лечению, а также повысили доступность медицинской помощи для населения на уровне современных стандартов. Органическое развитие медицины существенно увеличило продолжительность жизни отдельных категорий больных, например проходящих лечение в инфекционных или онкологических отделениях. Теперь перед научным сообществом стоит новая и, вероятно, более сложная задача – восстановить утраченное здоровье пациента.

Уже предприняты первые результативные шаги в решении данной задачи. Одним из них можно считать постепенное внедрение в систему здравоохранения подходов персонализированной реабилитации путем подготовки междисциплинарных реабилитационных команд, которые уже показали свою эффективность [1, 2]. Другой подход заключается в совершенствовании инструментов реабилитации – оборудования, технологий и методов проведения медицинских восстановительных процедур. Одним из последних является гипербарическая оксигенация (ГБО).

Под ГБО понимают искусственное увеличение кислородной емкости крови вследствие дополнительного растворения кислорода в плазме крови путем повышения парциального давления кислорода во вдыхаемой газовой смеси за счет увеличения общего барометрического давления внешней среды [3]. Данный метод используют в медицине как на этапе лечения пациентов (например, при COVID-19 и отравлениях угарным газом), так и на этапе реабилитации (в частности, после инсультов и черепно-мозговых травм) [4–7].

В рамках данного обзора проведен анализ применения технологии ГБО в реабилитации пациентов, страдающих различными заболеваниями. Подробно рассмотрены отдельные исторические аспекты и причины внедрения метода, механизмы, через которые реализуется его положительное действие, и используемое оборудование. Также представлены обновленные данные о показаниях, противопоказаниях, безопасности и эффективности использования ГБО в терапии и реабилитации больных с различными нозологиями.

ИСТОРИЯ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ / HISTORY OF DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION

Первым зафиксированным случаем применения ГБО принято считать кислородную терапию британского врача N. Henshaw, примененную в 1662 г. Тогда была создана герметичная палата, куда поступали пациенты с заболеваниями легких и пищеварительной системы [8].

В 1775 г. английский ученый J. Priestly открыл кислород. Исследователь указал на эффективность кислорода в лечении ран и выявил токсические свойства данного газа при использовании его в высоких концентрациях [8]. Уже в 1796 г. T. Beddoes использовал кислород в лечении пациентов [9].

В начале 1830-х гг. Junod и Fabare построили медную сферическую барокамеру, в которой давление воздуха могло достигать 2–4 атм, и с 1834 г. в ней начали проходить лечение пациенты с легочными заболеваниями. Спустя 3 года (1837 г.) была создана более крупная камера, которая уже вмещала 12 человек [10].

В 1859 г. в Англии во время строительства железнодорожного Королевского моста Альберта, перекинутого через реку Теймар от Солтэша до Плимута, среди строителей, работавших в условиях повышенного давления, впервые была зарегистрирована смерть от кессонной (декомпрессионной) болезни [10].

Впервые барокамера была использована для лечения нервных расстройств в 1861 г. Через 15 лет (1876 г.) Kelly изобрел гипербарическую камеру Compressed Air Bath Apparatus, представлявшую собой медицинский шлюз с двумя запорными пластинами, которые под давлением герметизировались, и запорным клапаном снаружи для управления [10].

Период 1880–90-х гг. был временем возведения великих инженерных сооружений, в т.ч. мостов и туннелей. Как следствие, среди рабочих стали чаще регистрироваться случаи кессонной болезни. Так, при строительстве Бруклинского моста зафиксировано 110 таких случаев. В тот же период было впервые успешно проведено лечение данной болезни в гипербарической камере. В 1878 г. P. Bert задокументировал токсическое воздействие гипербарического кислорода на центральную нервную систему, проявлявшееся судорогами [10, 11].

В 1990-е гг. в Великобритании J.S. Haldane первым сформулировал научный подход к использованию гипербарической камеры в лечении пациентов. В 1908 г. он же разработал декомпрессионные таблицы I и II адмиралтейства Соединенного Королевства для планирования безопасного погружения. В то время гипербарическая терапия и глубоководные погружения проводились в тесном переплетении научной и инженерной мысли. В 1910 г. было спущено на воду спасательное судно императорского флота Германии SMS Vulkan с тяжелым подъемным оборудованием и водолазами на борту, оснащенное санитарным шлюзом для оказания медицинской помощи водолазам сразу же по возвращении на борт [10, 11].

В 1912 и 1913 гг. в США и Германии были построены испытательные резервуары и водолазные тренажеры для изучения воздействия гипербарической среды на организм человека. В 1938 г. O. de Almeida et al. применили ГБО для лечения лепры. End et al. в 1942 г. в эксперименте на крысах показали эффективность ГБО в терапии отравлений угарным

газом. В 1961 г. Voerema et al. указали на целесообразность использования ГБО в лечении пациентов с газовой гангреной. В 1970-х гг. метод ГБО внедрен для медицинских целей в СССР и Японии, а через 10 лет – в Китае. В 1987 г. S. Jain продемонстрировал целесообразность применения ГБО в реабилитации пациентов [10].

Безусловно, здесь не упомянуто множество других примечательных исторических дат, имеющих большое значение для понимания значимости и широты медицинского использования ГБО. Однако приведенная информация обозначает путь развития инженерии и медицины в отношении данного метода от его зарождения в XVIII веке до настоящего времени. Сегодня ГБО можно с уверенностью считать консервативным немедикаментозным способом лечения и реабилитации пациентов, имеющим, по самым скромным оценкам, вековую историю.

МЕХАНИЗМЫ ДЕЙСТВИЯ / ACTION MECHANISMS

Исторический экскурс показал широкие возможности применения ГБО в терапии пациентов с различными нозологиями. Далее будут рассмотрены основные механизмы реализации терапевтического эффекта этого вида кислородной терапии.

Увеличение парциального давления кислорода / Increasing oxygen partial pressure

Доказана эффективность применения ГБО в терапии ряда жизнеугрожающих состояний, связанных с гипоксией или нарушениями активности дыхательной цепи. Гипербарическая кислородная терапия восстанавливает нарушенную функцию митохондрий, в т.ч. клеточное дыхание и продукцию аденозинтрифосфата (АТФ), а также перфузию тканей за счет увеличения диффузии кислорода. Данный метод является перспективным для пациентов с инфекционными заболеваниями легких, т.к. имеется информация об отсутствии существенных нежелательных явлений (например, острого респираторного дистресс-синдрома), характерных для других видов кислородной терапии [12–14].

Профилактика чрезмерной индукции провоспалительных процессов / Preventing excessive induction of proinflammatory processes

Известно, что гипербарическая кислородная терапия сокращает выраженность воспалительных процессов, затрагивая ряд важнейших элементов клеточной регуляции, участвующих в реализации воспаления. Показана способность ГБО существенно снижать концентрации интерлейкина-1 (ИЛ-1), ИЛ-6, фактора некроза опухоли альфа (ФНО-α), неоптерина и миелопероксидазы в сыворотке крови пациентов. Одновременно уменьшаются показатели маркеров окислительного стресса, а именно малонилдальдегида и карбонила, в плазме крови. Также получены данные об увеличении концентрации ИЛ-10 (одного из противовоспалительных цитокинов) у крыс, получавших радиотерапию и ГБО, в отличие от животных, которые проходили только радиотерапию. Все это указывает на способность ГБО подавлять продукцию провоспалительных цитокинов и увеличивать синтез противовоспалительных цитокинов, в частности ИЛ-10 [15].

Антибактериальное действие / Antibacterial effect

В многочисленных исследованиях показана целесообразность назначения ГБО пациентам с инфекционными заболеваниями [16–18]. Концентрация кислорода в инфицированной зоне является важнейшим фактором, влияющим на антибактериальную активность нейтрофилов. Данный механизм реализуется за счет окислительного взрыва, что приводит к образованию активных форм кислорода и взрывному росту метаболической активности нейтрофилов, для которых требуется большое количество кислорода. Тем самым реализуется прямое антимикробное действие ГБО.

Не менее важными являются и непрямые механизмы антибактериального действия применяемой терапии. Так, при гипербарической кислородной терапии наблюдают увеличение продукции оксида азота (NO), что приводит к ингибированию последней адгезии нейтрофилов к поверхности эндотелия вследствие нарушения взаимодействия β-интегрина нейтрофилов с молекулами межклеточной адгезии на поверхности эндотелия. В свою очередь, это повышает мобилизацию нейтрофилов и способствует миграции клеток в инфекционный очаг. Увеличение продукции NO вызывает нитрозилирование актина нейтрофилов и стимулирует полимеризацию цитоскелета. Учитывая, что процесс фагоцитоза тесно связан с перестройкой цитоскелета, повышение фагоцитарной активности нейтрофилов при ГБО имеет по меньшей мере теоретическое обоснование [12, 19, 20].

Индукция репаративных процессов и увеличение переносимости реперфузионных повреждений / Induction of reparative processes and increased tolerance to reperfusion injury

При ГБО наблюдаются индукция репаративных процессов и увеличение переносимости реперфузионных повреждений клетками. В основе таких эффектов лежат как минимум два процесса: увеличение концентрации факторов роста и мобилизация стволовых или прогениторных клеток [21].

В нескольких исследованиях *in vivo* показано, что ГБО приводит к усилению синтеза факторов, индуцируемых гипоксией (англ. hypoxia-inducible factors, HIF), особенно в пораженных участках. При нормоксии HIF подвергаются деградации. Однако активность HIF не связана напрямую с уровнем парциального давления кислорода в крови, а является следствием избыточного количества свободных радикалов, рост которых и наблюдается при гипоксии. Ситуация примечательна тем, что, несмотря на отсутствие гипоксии, при ГБО происходит образование данных продуктов окисления, что, в свою очередь, запускает синтез тиоредоксина – одного из элементов антиоксидантной защиты, который выступает фактором транскрипции генов HIF. Далее HIF стимулируют активность остальных факторов неоваскуляризации ткани. Ключевым механизмом мобилизации стволовых или прогениторных клеток является увеличение активности эндотелиальной синтазы NO в костном мозге путем стимулирования синтеза NO. Следует отметить, что ряд других исследований *in vivo* указывает на подавление активности HIF при ГБО [21–23].

При гипербарической кислородной терапии у пациентов в области раны увеличивается синтез фактора роста эндотелия сосудов – одного из основных факторов неоваскуляриза-

ции. Также известно о стимулировании ряда других факторов роста при ГБО: основной фактор роста фибробластов, трансформирующий фактор роста $\beta 1$, ангиопоэтин-2, фактор роста гепатоцитов и тромбоцитарный фактор роста [21].

Увеличение переносимости реперфузионных повреждений клетками обусловлено способностью ГБО подавлять одно из ранних событий постишемического реперфузионного повреждения – прикрепление циркулирующих нейтрофилов к эндотелию сосудов с помощью $\beta 2$ -интегринов. Данная особенность терапии выявлена и подтверждена в многочисленных исследованиях, посвященных изучению реперфузионных нарушений головного мозга, сердца, легких и других органов. Способность ГБО снижать выраженность дефектов установлена только в рамках профилактики реперфузионных повреждений [21].

ОБОРУДОВАНИЕ / EQUIPMENT

Проведение ГБО осуществляется в барокамерах различных видов. К помещению и персоналу, где их устанавливают, выдвигаются повышенные требования в отношении пожаро- и взрывобезопасности. Существующие барокамеры можно разделить на группы по признаку мобильности (стационарные, портативные и мобильные) или вместительности (специальные детские, одноместные и многоместные).

Мобильность / Mobility

Стационарные барокамеры располагаются в отдельных помещениях, регулярного перемещения данного оборудования не предусмотрено. Они представлены не только камерами небольшого размера, но и отдельными комнатами на несколько пациентов. Портативные барокамеры являются достаточно легкими, что дает некоторую свободу в перемещении оборудования, в отличие от стационарного. Данный вид барокамер условно можно считать промежуточным между стационарными и мобильными камерами для ГБО. Мобильные барокамеры представляют собой контейнеры, установленные на транспортных средствах, например на грузовиках или кораблях [24, 25].

Вместительность / Capacity

Специальные детские барокамеры имеют сравнительно небольшой размер, зачастую являются одноместными и, как правило, располагаются в больницах, клиниках педиатрической направленности или родильных домах. Одноместные барокамеры сравнительно дешевы и просты в эксплуатации, но в то же время пожароопасны, а доступ медицинского персонала к пациенту во время проведения терапии отсутствует. Многоместные барокамеры имеют неоспоримые преимущества: возможности доступа медперсонала к пациенту во время процедуры и переоснащения камеры в операционную либо иные узкопрофильные помещения больницы. Однако высокая цена и сложность технологического обслуживания

такого оборудования зачастую становятся непреодолимыми преградами для медицинских учреждений [24].

Производители / Manufacturers

Производство современных барокамер для проведения ГБО требует наличия новейших материалов, технологий и высококвалифицированного персонала. Вполне закономерно, что количество производителей такого оборудования достаточно ограничено. Среди зарубежных компаний можно выделить HAUX-Life-Support GmbH (Германия)¹, Sechrist Industries Inc. (США)² и Fink Engineering (Австралия)³. Представлены на рынке и отечественные производители: АО «Государственный космический научно-производственный центр им. М.В. Хруничева» (Москва)⁴, ООО «Нижегородский областной бароцентр» (Нижний Новгород)⁵, ООО «Эверест» (Санкт-Петербург)⁶ и др.

ПОКАЗАНИЯ / INDICATIONS

В восстановительной медицине использование высокотехнологичного оборудования в комбинации с персонализированным подходом к пациенту позволяет снизить, а порой и исключить риск возникновения осложнений перенесенного заболевания. Своевременная медицинская поддержка с использованием метода гипербарической кислородной терапии может стать решающим фактором в восстановлении утраченного здоровья. На текущий момент сводного официального документа, в котором был бы закреплён список показаний к применению ГБО, не представлено [12, 26, 27]. Однако рассмотренные ранее механизмы, инициируемые при ГБО, вполне закономерно отражаются в показаниях к применению.

Неврологические заболевания / Neurological diseases

К неврологической группе показаний отнесены заболевания с нарушениями центральной или периферической нервной системы. В качестве ярких примеров можно привести следующие патологические состояния: инсульт, травмы головного или спинного мозга и детский церебральный паралич [12, 26, 27].

Травмы / Injuries

Репарационный механизм действия ГБО прекрасно раскрывается при реабилитации пациентов, перенесших травмы. Гипербарическая кислородная терапия позволяет быстрее восстановиться после переломов, повреждений связок, сухожилий или иных травм. Реализацию данного механизма также можно наблюдать в реабилитации пациентов с трофическими язвами, пролежнями, ожогами или диабетической стопой [12, 26–30].

Хирургические вмешательства / Surgeries

В хирургической практике ГБО имеет немалое значение. Так, применение гипербарической кислородной терапии по-

¹ <https://hauxlifesupport.de/en>.

² <https://www.sechristusa.com>.

³ <https://www.fink.com.au>.

⁴ <http://www.khrunichev.ru>.

⁵ <https://baroox.ru>.

⁶ <https://everest-baro.ru>.

звolyет снизить выраженность послеоперационного отека, воспаления и риск возникновения инфекционных осложнений. Репарационный механизм также реализуется у пациентов данного профиля, что проявляется в ускорении заживления ран и ревазуляризации тканей с нарушенной трофикой. В целом метод ГБО имеет широкие показания при проведении реабилитации у хирургических больных и ограничен лишь наличием противопоказаний [12, 26, 27].

Инфекционные заболевания / Infectious diseases

В инфекционной практике гипербарическая кислородная терапия демонстрирует свой противовоспалительный потенциал и антибактериальный эффект. Так, пациентам с выявленными некротическими и инфекционными процессами (например, с газовой гангреной, некротизирующим фасциитом, паникулитом, остеомиелитом, радиационными повреждениями тканей или сепсисом) показаны сеансы ГБО [31–37].

Нарушения кровообращения / Circulatory disorders

Имеются данные о целесообразности применения гипербарической кислородной терапии в лечении пациентов с патологическими состояниями, связанными с нарушением кровообращения. К ним относят синдром сдавления (краш-синдром), тромбозы, включая тромбозы сосудов сетчатки, глубокие обморожения, ишемический инсульт и ишемию конечностей. Эффективность ГБО в коррекции таких нарушений связывают с ее способностью снижать выраженность постишемических реперфузионных повреждений [7, 38–42].

Отравления, баротравмы, декомпрессионная болезнь / Poisoning, barotrauma, decompression sickness

Следует отметить лечебный эффект гипербарической кислородной терапии при отравлении. Эффективность данного метода обусловлена увеличением парциального давления кислорода в крови за счет изменения условий окружающей среды по время проведения сеансов. Также показанием к назначению ГБО является наличие баротравмы легких, декомпрессионной болезни или артериальной воздушной эмболии вследствие травмы. При таких состояниях пациентам проводят рекомпрессию – повышение внешнего давления до уровня, при котором исчезают симптомы заболевания, со ступенчатым снижением давления через заданные временные интервалы.

Последние две группы показаний относятся скорее к методам лечения заболеваний, нежели реабилитации. Однако, учитывая особое внимание к ГБО и широкое внедрение реабилитации в последние годы, можно допустить появление в ближайшем будущем клинических исследований целесообразности применения гипербарической кислородной терапии в реабилитации пациентов, перенесших отравления, баротравмы или декомпрессионную болезнь [12, 26, 27, 43–45].

Постковидный синдром, фибромиалгия, синдром хронической усталости / Post-COVID syndrome, fibromyalgia, chronic fatigue syndrome

Безусловно, существует достаточно большое количество иных патологических состояний, требующих проведения ГБО

на этапе восстановления. В качестве ярких примеров можно привести такие показания к применению данного метода, как постковидный синдром, фибромиалгия и синдром хронической усталости.

Кроме того, в ближайшее время спектр показаний к проведению ГБО может быть существенно расширен, на что указывает достаточно высокая публикационная активность в данной области за последние 5 лет [46–48].

ПРОТИВОПОКАЗАНИЯ / CONTRAINDICATIONS

Применение ГБО в реабилитации пациентов может иметь решающее значение в восстановлении здоровья. Поиск официальных документов, в которых был бы приведен сводный список противопоказаний к проведению гипербарической кислородной терапии, не увенчался успехом. И все же в некоторых случаях назначение ГБО может быть противопоказано. Условно все противопоказания можно разделить на два вида: абсолютные и относительные.

Абсолютные противопоказания / Absolute contraindications

К абсолютным противопоказаниям относят состояния, при которых у пациентов регистрируется отсутствие вентиляции отдельных участков органов респираторной системы, не поддающиеся фармакологической коррекции. К ним можно отнести пневмоторакс и буллезную эмфизему легких. При прохождении гипербарической кислородной терапии такие больные подвергаются чрезмерному риску разрыва плевральной полости или булл вследствие изменения давления внешней среды [49].

Относительные противопоказания / Relative contraindications

Остальные противопоказания следует рассматривать как относительные, поскольку пациенты могут быть допущены к данному виду реабилитационного лечения после осуществления фармакологической коррекции или при наличии медицинского персонала в барокамере в случае реализации негативного прогноза [49].

Заболевания сердечно-сосудистой системы

Повышение давления среды в процессе терапии способно усугубить течение отдельных заболеваний сердечно-сосудистой системы. Так, скоротечное повышение давления может вызвать гипертонический криз у пациентов с гипертонической болезнью или оказать чрезмерную нагрузку на сердце, а также негативно сказаться на состоянии больных с сердечной недостаточностью. При эффективной фармакологической коррекции данных состояний пациенты допускаются к прохождению ГБО [49, 50].

Пациенты с кардиостимуляторами или другими электрическими имплантируемыми устройствами должны уточнить у производителя импланта вопрос безопасности применения медицинских изделий в среде со 100% кислородом и высоким давлением. Это обусловлено риском возникновения возгорания электрического импланта. При подтверждении безопасности его эксплуатации в данных условиях больному может быть назначена гипербарическая кислородная терапия [49].

Респираторные заболевания

В острой фазе некоторых респираторных заболеваний при отеке верхних дыхательных путей назначение ГБО противопоказано из-за риска возникновения баротравмы. Применение антиконгестантов, а также других лекарственных средств, направленных на устранение обструкции дыхательных путей, позволяет существенно снизить риск баротравм легких, среднего и внутреннего уха у пациентов с респираторными заболеваниями, проходящих гипербарическую кислородную терапию [49].

Операции на грудной полости, хроническая обструктивная болезнь легких

Наличие в анамнезе недавней операции на грудной полости или диагностированная хроническая обструктивная болезнь легких также являются относительными противопоказаниями к назначению ГБО из-за риска возникновения баротравмы при проведении сеанса лечения. С целью нивелирования данного негативного проявления выполняется функциональное тестирование легких и применяются методы визуализации грудной полости, в частности рентгенография, компьютерная томография и др., для исключения пневмоторакса или иных явлений, связанных с нарушением проходимости воздуха в грудной полости [49].

Прием некоторых препаратов

Реабилитация с применением методов лечения, приводящих к быстрому насыщению крови кислородом, включая ГБО, противопоказана пациентам, принимающим блеомицин, доксирубицин, дисульфам, амфенида или цисплатина ацетат, из-за риска увеличения токсичности препаратов. Временное прекращение приема данных лекарственных средств или их замена может рассматриваться как повод к повторной оценке целесообразности назначения ГБО [50].

Глаукома, операция на глаза

Наличие глаукомы или недавней операции на глаза является относительным противопоказанием к назначению гипербарической кислородной терапии в реабилитации. Пациенты допускаются до ГБО при проведенной фармакологической коррекции заболевания или визуализации органов зрения с целью исключения пузырьков воздуха. Также к относительным противопоказаниям к использованию рассматриваемого метода можно отнести повышенную чувствительность к высокой концентрации кислорода [49, 50].

Клаустрофобия, сахарный диабет, хронический синусит, гипертермия, гипертиреоз

Список относительных противопоказаний для проведения ГБО можно дополнить наличием клаустрофобии, сахарного диабета, хронического синусита, гипертермии или гипертиреоза. Эффективная медикаментозная коррекция указанных состояний позволяет рассматривать ГБО в качестве одного из средств реабилитации пациентов данных профилей. У больных с судорогами в анамнезе или беременных женщин оценивают необходимость применения гипербарической кислородной терапии и проведение сеанса осуществляют в щадящем режиме, а именно снижая целевой уровень атмосферного давления в камере [49].

Онкологические заболевания

Также имеются разнящиеся данные о риске потенцирования опухолевых процессов при ГБО среди пациентов с онкологическими заболеваниями, обусловленном индуцирующим влиянием данного вида терапии на ангиогенез. Однако недавние работы показали обратный эффект гипербарической кислородной терапии. Так, в экспериментальных исследованиях на двух моделях рака молочной железы и модели глиомы в условиях ГБО наблюдалось подавление роста новых сосудов. В совокупности с данными, приведенными в обзоре литературы J. Feldmeier et al. (2003 г.) [50], можно сделать вывод об отсутствии риска потенцирования опухолевых процессов при проведении ГБО [49, 50–53].

БЕЗОПАСНОСТЬ / SAFETY

Среди всех аппаратных методов медицинской реабилитации применение ГБО является одним из самых безопасных. Однако в редких случаях у пациентов, проходящих гипербарическое лечение кислородом, регистрируются нежелательные явления. Можно выделить следующие группы побочных эффектов: баротравмы, отравление кислородом, токсическое влияние на органы зрения. Подавляющее большинство из них при проведении ГБО проявляются редко (0,01%) [54]. В отдельных случаях сбор анамнеза у пациента позволяет исключить возникновение побочных явлений при гипербарической кислородной терапии.

Баротравмы / Barotraumas

Баротравмы занимают значительную долю среди всех наблюдаемых негативных эффектов проводимого лечения.

Баротравма среднего уха – одно из самых распространенных нежелательных явлений при ГБО. Пациенты, как правило, сообщают о трудности выравнивания давления в ушах, об ощущении давления, боли в ушах и дискомфорте при подаче давления в камеру [55]. Отсутствие своевременных мер со стороны медицинского персонала может привести к отеку среднего уха, ретракции и разрыву барабанной перепонки с кондуктивным дефицитом слуха. В редких случаях баротравма среднего уха может передаваться во внутреннее ухо, что чревато разрывом мембраны круглого или овального окна и нарушением функции внутреннего уха. Это вызывает головокружение и нейросенсорную тугоухость [56].

Баротравмы синусов и околоносовых пазух отмечаются при наличии инфекции верхних дыхательных путей или аллергического ринита [57]. Пациенты во время компрессии барокамеры сообщают об ощущении давления в надлобных пазухах, переходящем в боль. Болевая составляющая уходит после выравнивания давления в камере и пазухах. Повторный приступ боли возникает во время проведения декомпрессии и связан со сложностью выхода избыточного давления из пространства пазух [58].

Баротравма зубов может проявляться зубной болью либо разрушением зуба. Боль возникает в ответ на компрессию и декомпрессию воздуха, который находится или под пломбой леченого зуба, или в дентине [59]. В случае, если нагрузка на зуб становится избыточной, происходит раскалывание зуба. Причиной данного нежелательного явления, как правило, считают инфекционные заболевания ротовой полости [59, 60].

Еще одним видом баротравм является баротравма легких. При данном нежелательном явлении у больных во время процедуры декомпрессии наблюдается сложность с выходом воздуха из легких, которая может привести к пневмотораксу, отеку легких или внутрилегочному кровотечению. Эти реакции, как правило, отмечаются у пациентов, имеющих в анамнезе астму, буллезную болезнь легких или хроническую обструктивную болезнь легких с бронхоспазмом. Такой побочный эффект может встречаться и у пациентов со здоровыми легкими, но задерживающих дыхание во время проведения ГБО [61, 62].

Кислородное отравление / Oxygen toxicity

Кислородное отравление при гипербарическом лечении кислородом – достаточно хорошо изученное явление. Токсическое воздействие ГБО на центральную нервную систему было описано в 1878 г. Р. Bert [11]. Однако по истечении почти 150 лет механизмы такого эффекта остаются предметом обсуждений. В настоящее время особое внимание уделяется роли окислительного стресса в изменении электрической активности головного мозга и церебральным сосудистым изменениям.

Признаки кислородного отравления у пациентов проявляются в виде подергиваний, зрительного сосредоточения, слуховых галлюцинаций, головокружений, беспокойства и тонико-клонических судорог в течение сеанса ГБО. При этом после окончания процедуры состояние нормализуется без каких-либо выраженных морфологических изменений неврологической направленности [63–65].

Влияние на органы зрения / Effect on visual organs

Токсическое влияние на органы зрения представлены миопией, катарактой и фиброплазией. Указанные нежелательные явления возникают у пациентов после продолжительного применения ГБО – как правило, в течение нескольких недель. Механизм возникновения миопии до конца не изучен, но существенную роль в развитии патологии играет оксидативное повреждение структур глазного яблока. Оксидативный стресс при гипербарической кислородной терапии может стать причиной развития катаракты из-за повреждения стромы роговицы. Ретролентальная фиброплазия затрагивает в основном младенцев и связана с нарушением нормальной васкуляризации сетчатки, что в дальнейшем приводит к ухудшению зрения и слепоте [66–68].

ЭФФЕКТИВНОСТЬ / EFFECTIVENESS

Учитывая достаточно широкий охват показаний к применению ГБО в лечении и реабилитации пациентов, ожидаемым стало выявление большого количества клинических исследований (как отечественных, так и зарубежных), целью которых являлось изучение эффективности применения данного метода. Далее приведены результаты рандомизированных контролируемых испытаний (РКИ) или метаанализов ввиду их высокого уровня доказательности.

Сердечно-сосудистые заболевания / Cardiovascular diseases

Э.А. Доценко и Д.П. Саливончик (2010 г.) [69] в открытом РКИ изучили эффективность ГБО в лечении пациентов, стра-

дающих ишемической болезнью сердца. В исследование вошли 1210 пациентов с инфарктом миокарда, нестабильной стенокардией или стабильной стенокардией напряжения, которых распределили в две группы. Участники первой группы ($n=272$, 230 мужчин и 42 женщины, средний возраст $56,5 \pm 10,4$ года) проходили курс гипербарической кислородной терапии (6 сеансов) в дополнение к стандартному протоколу лечения. Во второй группе ($n=938$, 696 мужчин и 242 женщины, средний возраст $57,4 \pm 10,7$ года) пациенты получали только стандартное лечение. Срок наблюдения составил 2 года. К окончанию исследования у пациентов с инфарктом миокарда и нестабильной стенокардией, проходивших дополнительно курс ГБО, наблюдалось статистически значимое снижение уровня смертности до 2,9% (8 случаев) по сравнению с аналогичным показателем у участников, которые получали только стандартную терапию – 9,6% (90 случаев) ($p=0,001$). Между больными со стабильной стенокардией из двух групп наблюдения сравнение показателя выживаемости за 2-летний период не выявило существенных различий ($p>0,05$) [69].

В РКИ, выполненном М. Dekleva et al. (2004 г.) [70], с участием 74 пациентов (63 мужчины и 11 женщин, средний возраст 55 ± 7 лет) с острым инфарктом миокарда продемонстрирована эффективность ГБО после проведения экстренной базовой терапии. Участники контрольной группы ($n=37$) получали только базовую терапию (стрептокиназа в дозе 1,5 мкг/л в течение 30–60 мин). В основной группе ($n=37$) после базовой терапии однократно проводилась ГБО, в среднем через 10 ч. Пациенты находились под наблюдением в течение 3 нед. У участников основной группы отмечено статистически значимое снижение индекса конечного систолического объема, индекса конечного диастолического объема и увеличение фракции выброса по сравнению с аналогичными показателями в контрольной группе (28,18 против 36,68 мл/м², 56,2 против 63,8 мл/м², 44,05% против 50,81% соответственно; $p<0,001$ в каждом случае) [70].

Х.Р. Tang et al. (2011 г.) [71] провели РКИ, посвященное изучению эффективности применения гипербарической кислородной терапии у пациентов, перенесших клипирование внутричерепной аневризмы. В исследовании участвовали 120 человек, которых распределили в две группы ($n=60$). В основной группе после стабилизации состояния проводился курс ГБО (1 сеанс в день, не менее 20 сеансов). На 7-й и 14-й дни у пациентов из группы контроля отмечено статистически значимое снижение скорости циркуляции в средней мозговой артерии по сравнению с аналогичным показателем в основной группе ($p<0,05$ и $p<0,01$ соответственно). В этих же контрольных точках среди участников основной группы статистически реже фиксировали симптомы спазма сосудов головного мозга. У пациентов основной группы на 7-й, 14-й и 21-й дни регистрировалась меньшая плотность тканей в зоне оперативного вмешательства, чем в группе контроля ($p<0,05$). Среди участников основной группы функциональное состояние здоровья, оцененное по шкале Карновски, было статистически значимо выше на 21-й день после операции, чем в группе контроля ($p<0,05$). Спустя 6 мес после лечения у пациентов основной группы статистически чаще встречались наивысшие оценки по шкале исходов Глазго (4 или 5 баллов), чем у участников группы контроля ($p<0,05$) [71].

Обобщая результаты клинических исследований и акцентируя внимание на их высоком уровне достоверности, можно сделать вывод о существенной эффективности ГБО на ранних этапах реабилитации. Однако эффективность применения данного вида терапии в реабилитации пациентов со стабильными формами сердечно-сосудистых патологий остается под вопросом [69].

Заболевания нервной системы / Nervous system diseases

А.А. Кукшина и др. (2022 г.) [72] в открытом проспективном сравнительном когортном РКИ изучили эффективность ГБО в реабилитации медицинских работников с симптомами эмоционального выгорания ($n=50$) в период пандемии COVID-19. В контрольной группе ($n=19$) проводился курс лечебной физической культуры. В основной группе участникам дополнительно назначали курс ГБО (ежедневно в течение 10 дней). Применение гипербарической терапии кислородом позволило снизить выраженность признаков депрессии за счет устранения умеренно выраженной и легкой депрессивной симптоматики до полного отсутствия симптомов депрессии ($p<0,001$ по сравнению с исходными данными). В основной группе наблюдалось умеренное снижение тревожности ($p<0,01$ по сравнению с исходными данными) [72].

В проспективном РКИ, выполненном К. Doenys-Barak et al. (2022 г.) [73], рассматривалась эффективность ГБО в лечении ветеранов боевых действий с посттравматическим стрессовым расстройством (ПТСР). Пациенты контрольной группы ($n=15$, средний возраст $32,4\pm 9,2$ года) проходили курс психотерапии, которая была назначена еще до включения в исследование. В основной группе ($n=14$, средний возраст $39,3\pm 8,1$ года) помимо ранее назначенной психотерапии проводился курс ГБО (60 сеансов, 5 дней в неделю). Среди пациентов, проходивших гипербарическую кислородную терапию, отмечено существенное восстановление показателей клинического состояния по шкале ПТСР-5 ($p<0,0001$), краткому опроснику симптомов ($p=0,024$) и шкале депрессии Бека ($p=0,01$). На фоне улучшения субъективной оценки своего состояния пациентами основной группы наблюдалось повышение активности мозга в левой дорсолатеральной префронтальной, средней височной извилинах, обоих таламусах, левом гиппокампе и левой инселе ($p<0,0003$), а также значительное увеличение фракционной анизотропии во фронтолимбическом белом веществе, головке мозолистого тела и фортиске ($p<0,004$) [73].

J.J. Feng et al. (2017 г.) [74] в РКИ изучили влияние гипербарической кислородной терапии на течение депрессии у пациентов с неполной спинномозговой травмой. Участников исследования разделили на три группы. Пациенты 1-й группы ($n=20$) проходили ГБО в дополнение к стандартной реабилитации, участники 2-й группы ($n=20$) получали психотерапевтическую помощь и стандартную реабилитационную поддержку, в 3-й группе проводился курс стандартной реабилитации ($n=20$). Процедуры выполнялись 1 раз в день по 6 дней в неделю в течение 8 нед. У пациентов 1-й группы наблюдалось снижение выраженности депрессии по шкале Гамильтона по сравнению с аналогичными показателями в других группах ($p<0,05$ в каждом случае). Выраженность тревоги по шкале Гамильтона у больных, проходивших дополнительно ГБО, была меньше, чем в 3-й группе ($p<0,05$). Зарегистрировано улучшение состояния пациентов 1-й и 2-

групп по сравнению с 3-й группой при оценке по шкале Американской ассоциации травм позвоночника (англ. American Spinal Injury Association, ASIA) и шкале функциональной независимости ($p<0,05$ в каждом случае) [74].

В проспективном РКИ S. Efrati et al. (2013 г.) [75] исследовали эффективность ГБО в активации нейропластичности у пациентов с хроническими неврологическими нарушениями после инсульта. Больные основной группы ($n=30$) проходили ГБО в течение 2 мес (40 сеансов, 5 дней в неделю). Участники перекрестной группы ($n=29$) первые 2 мес не получали терапию, затем прошли аналогичный курс ГБО. У всех пациентов, проходящих ГБО, наблюдалось улучшение субъективной оценки состояния здоровья, тогда как улучшения показателей в перекрестной группе в период до прохождения лечения выявлено не было. Клинические данные соотносились с объективными показателями состояния здоровья, полученными при однофотонной эмиссионной компьютерной томографии. Повышенная активность мозга была отмечена в зонах живых клеток с изначально низкой активностью [75].

X. Li et al. (2024 г.) [7] провели метаанализ 8 РКИ с участием 493 пациентов с целью изучения эффективности и безопасности ГБО в дополнение к стандартному лечению острого ишемического инсульта. Не было выявлено статистически значимых различий между контрольной группой и пациентами, получавшими дополнительно ГБО, по показателям шкалы оценки инсульта Национальных институтов здравоохранения (англ. National Institutes of Health, NIH), индекса Бартела, уровня ФНО- α , растворенной формы молекулы межклеточной адгезии, растворенной формы белка адгезии сосудистых клеток, растворенной формы Е-селектина, С-реактивного белка. Однако показано, что применение гипербарической кислородной терапии улучшает состояние пациентов по показателям модифицированной шкалы Рэнкина [7].

В рандомизированном двойном слепом исследовании с фиктивным контролем A. Haddany et al. (2022 г.) [76] изучили эффективность ГБО в реабилитации детей в возрасте от 8 до 15 лет со стойким постконтузионным синдромом. Пациентам основной группы ($n=15$) назначали ГБО (60 сеансов, ежедневно). Участники контрольной группы ($n=10$) проходили фиктивное лечение. Среди детей, получавших гипербарическую кислородную терапию, отмечено значительное улучшение когнитивных функций по следующим показателям: общий балл оценки когнитивной функции, память, исполнительная функция, эмоциональная оценка, гиперактивность, общий балл оценки исполнительной функции, планирование/организация. Результаты клинического осмотра и оценки соотносились со значительным улучшением микроструктурных изменений головного мозга в инселе, супрамаргинальных, языкоглоточных, нижних лобных и фузиформных извилинах [76].

X. Li et al. (2017 г.) [77] в проспективном РКИ оценили целесообразность назначения ГБО в дополнение к стандартному лечению у 565 пациентов с острым тяжелым внутримозговым кровоизлиянием. Больные были распределены в пять групп. Участники 1-й группы получали дополнительно фиктивное лечение. Пациенты 2-й и 3-й групп проходили дополнительно курс ГБО с давлением 2 атм в течение 60 или 90 сеансов соответственно, а участники 4-й и 5-й групп – ГБО с давлением 1,5 атм в течение 60 или 90 сеансов соответственно. Среди пациентов из групп, проходивших ГБО, наблюдалось улучшение

клинического состояния по показателям модифицированного индекса Бартела, модифицированной шкалы Рэнкина, а смертность снизилась по сравнению с аналогичными показателями у участников, которые проходили фиктивное лечение ($p < 0,005$ в каждом случае). Частота кровотечений в верхних отделах желудочно-кишечного тракта (одного из осложнений острого внутримозгового кровотечения) составила 39,25%, 60,00%, 64,49%, 36,79% и 34,26% для пациентов 1–5-й групп соответственно. Этот показатель среди пациентов 2-й и 3-й групп был значительно выше по сравнению с участниками 1-й, 4-й и 5-й групп ($p < 0,005$ в каждом случае). Выявленные кровотечения не носили клинически значимого характера [77].

Таким образом, результаты, полученные авторами РКИ и метаанализа, подтверждают целесообразность применения ГБО в лечении заболеваний нервной системы. Однако следует отметить, что эффективность ГБО достаточно ограничена и этот метод лечения нужно рассматривать только в составе комплексной терапии, на что косвенно указывают данные метаанализа X. Li et al. (2024 г.) [7].

Эндокринные расстройства / Endocrine disorders

N.A.R. Nik Hisamuddin et al. (2019 г.) [29] в РКИ изучили эффективность ГБО в комплексной терапии пациентов с язвой диабетической стопы. В исследовании участвовали 58 пациентов с сахарным диабетом и язвами 2-й степени по Вагнеру. Больные основной группы ($n=29$) получали стандартное лечение и ГБО (5 дней в неделю, 30 сеансов). Участникам контрольной группы ($n=29$) назначали только стандартное лечение. В течение всего срока наблюдения у пациентов основной группы средние размеры раны были статистически значимо меньше, чем в контрольной группе ($p < 0,001$) [29].

В перекрестном РКИ, проведенном T. Sarabhai et al. (2023 г.) [78], с участием 12 мужчин с сахарным диабетом 2-го типа (возраст от 18 до 75 лет, индекс массы тела $< 35 \text{ кг/м}^2$, диапазон уровня гликированного гемоглобина 42–75 ммоль/моль (6–9%)) рассматривалось влияние ГБО на метаболизм глюкозы. Пациенты основной группы проходили ГБО, участники контрольной группы в условиях повышенного давления в барокамере получали нормальную воздушную смесь. Процедуры выполнялись двукратно по 2 ч. Среди больных, проходивших гипербарическую кислородную терапию, отмечено статистически значимое снижение уровня глюкозы в крови (на 19%) и повышение чувствительности к инсулину на треть по сравнению с аналогичными показателями в группе контроля ($p < 0,05$ в каждом случае). ГБО способствовала статистически значимому двукратному увеличению уровня γ -АТФ в печени, двукратному усилению митохондриального дыхания в скелетных мышцах и утроению выраженности митохондриального дыхания в белой жировой ткани по сравнению с показателями контрольной группы ($p < 0,05$ в каждом случае). Также ГБО усиливала стимулированное инсулином миоцеллюлярное серин-473/треонин-308-фосфорилирование Akt, но снижала базальное ингибиторное серин-1101-фосфорилирование IRS-1 (англ. insulin receptor substrate 1 – субстрат 1 рецептора инсулина) и стресс эндоплазматического ретикулаума ($p < 0,05$ в каждом случае) [78].

L. Ma et al. (2006 г.) [79] в РКИ оценили эффект ГБО в реабилитации пациентов с гипотиреозом после ^{131}I -терапии. Больным основной группы ($n=21$) была назначена ГБО, в от-

личие от группы контроля ($n=21$). ГБО не оказала существенного влияния на динамику уровня гормонов Т3 и Т4. Среди пациентов, которые проходили гипербарическую кислородную терапию, уровень тиреотропного гормона был статистически значимо ниже, чем в группе контроля ($p < 0,05$) [79].

Представленные исследования показывают целесообразность дополнения базовой терапии пациентов с заболеваниями эндокринной системы и их осложнениями. В то же время эффекты ГБО достаточно ограничены, в связи с чем данный метод необходимо использовать в комбинации с другими средствами терапии.

Онкологические заболевания / Oncological diseases

J.M. Henk et al. (1977 г.) [80] провели РКИ по изучению эффективности ГБО при лучевой терапии пациентов с онкологическими заболеваниями в области головы и шеи. Больные основной группы ($n=51$) проходили дополнительно курс ГБО (10 сеансов), участники группы контроля ($n=52$) получали фиктивное лечение (30 сеансов). В основной группе показатель 4-летней выживаемости был выше, чем в контрольной (56% против 27%; $p < 0,02$) [80].

Проспективное мультицентровое двойное слепое РКИ D. Annane et al. (2004 г.) [81] было посвящено оценке эффективности гипербарической кислородной терапии в лечении пациентов с остеорадионекрозом нижней челюсти после лучевой терапии онкологических заболеваний. В основной группе ($n=31$) проводился курс ГБО, в отличие от группы контроля ($n=37$). Спустя 1 год исследование было остановлено из-за выявленного потенциального риска ухудшения состояния здоровья пациентов в основной группе. К этому моменту выздоровление зафиксировано у 6 (19%) участников основной группы и у 12 (32%) участников контрольной группы. Время до прекращения лечения и время до облегчения боли было сопоставимо в обеих группах [81].

E.R. Watson et al. (1978 г.) [82] в РКИ рассматривали эффективность ГБО при лучевой терапии пациентов с карциномой шейки матки. В исследовании участвовали 320 пациентов. В основной группе ($n=161$) участники проходили гипербарическую кислородную терапию, в отличие от пациентов из группы контроля ($n=159$). Среди больных основной группы отмечены статистически значимые увеличение выживаемости ($p = 0,038$) и снижение рецидивов в местах локализации опухоли ($p < 0,001$). Наибольшая эффективность ГБО была выявлена у пациентов в возрасте до 55 лет с III стадией заболевания [82].

K.A. Chiles et al. (2018 г.) [83] в проспективном двойном слепом РКИ изучили эффективность ГБО в сохранении эректильной функции после двусторонней нервосберегающей радикальной простатэктомии по поводу рака предстательной железы. Пациенты контрольной группы ($n=43$) в дополнение к стандартной терапии получали фиктивное лечение, тогда как участники основной группы ($n=40$) дополнительно проходили курс ГБО (10 сеансов). Срок наблюдения составил 18 мес. Исследователи не выявили статистически значимых различий между группами в оцениваемых показателях восстановления эрекции по Международному индексу эректильной функции и расширенному индексу рака предстательной железы 26 (англ. Expanded Prostate Cancer Index Composite 26, EPIC-26) [83].

Обобщение данных о клиническом применении ГБО в исследованиях с высоким уровнем доказательности не позво-

ляет сделать однозначных выводов об эффективности данного метода лечения при онкологических заболеваниях и их осложнениях. Так, D. Annane et al. [81] и K.A. Chiles et al. [83] не наблюдали улучшения состояния пациентов с осложнениями после лечения онкопатологий, которые получали ГБО. В то же время J.M. Henk et al. [80] и E.R. Watson et al. [82] показали эффективность ГБО в улучшении прогноза течения заболевания среди онкологических больных, которые проходили лучевую терапию. Вероятно, существует целесообразность назначения ГБО параллельно с началом лечения злокачественных новообразований или на раннем этапе реабилитации, однако данная гипотеза требует проверки.

Травмы / Injuries

В слепом РКИ J.A. Niezgoda et al. (1997 г.) [84] выполнили оценку эффективности ГБО в заживлении ран. В исследование были включены 12 здоровых добровольцев (7 мужчин и 5 женщин), которым проводили иссечение кожи по эпидермису с последующим облучением ультрафиолетом раскрытой дермы. Волонтеры основной группы проходили ГБО, а участники контрольной группы получали воздух при гипербарической терапии. Процедуру лечения осуществляли дважды в день в течение 3 дней. У добровольцев, получавших ГБО, гиперемия раны уменьшилась на 42%, размер поражения – на 35%, а экссудация – на 22% ($p=0,05$, $p=0,03$ и $p=0,04$ соответственно по сравнению с контрольной группой). В отношении эпителизации раны существенных различий не отмечено [84].

РКИ, проведенное I.L. Millar et al. (2022 г.) [85], было посвящено влиянию ГБО на восстановление пациентов с открытыми переломами большеберцовой кости. В течение 48 ч после травмы больные были распределены на две группы. Участники контрольной группы получали стандартное послеоперационное лечение, а пациенты основной группы проходили дополнительно курс ГБО (12 сеансов). В течение первых 2 нед в основной группе статистически значимо снижалась частота возникновения некрозов ($p=0,01$ по сравнению с контролем). Также в данной группе реже фиксировались отдаленные осложнения ($p=0,007$), включая задержку сращения перелома ($p=0,04$). Показатели качества жизни через 1 и 2 года у пациентов, проходивших ГБО, были выше, чем в группе сравнения [85].

F. Ersoz et al. (2016 г.) [86] выполнили проспективное РКИ, рассмотрев влияние ГБО на заживление ран у пациентов, перенесших крестцово-копчиковое отростчатое заболевание и хирургическое лечение. Участники контрольной группы ($n=12$) проходили стандартное хирургическое лечение. Больным основной группы ($n=10$) помимо основного лечения был назначен курс ГБО (18 сеансов). У пациентов, проходивших дополнительно курс гипербарической кислородной терапии, время полной эпителизации оказалось значительно короче, чем в группе контроля ($p<0,001$) [86].

К.Л. Беляева и др. (2024 г.) [87] в РКИ с участием 31 пациента изучили влияние ГБО на показатели оксидативного стресса при тяжелой термической травме. Больных распределили в три группы. В 1-й группе ($n=11$) пациенты получали стандартное лечение, во 2-й группе ($n=11$) проводился дополнительный курс антиоксидантной терапии, в 3-й группе ($n=9$) – курс ГБО. Также в исследовании приняли участие 25 здоровых добровольцев, которые вошли в группу сравнения. Продолжительность исследования составила 14 сут.

Среди пациентов, которые проходили дополнительно курс ГБО, зарегистрировано статистически значимое увеличение активности супероксиддисмутазы и глутатионредуктазы по сравнению с исходными данными – на 9% ($p=0,038$) и 15% ($p=0,028$) соответственно [87].

В РКИ I. Simanic et al. (2013 г.) [88] оценили влияние ГБО на терапию пациентов с односторонней ампутацией нижних конечностей, обучающихся пользованию протезом. В основной группе участникам назначали дополнительно курс ГБО, в отличие от группы контроля. Среди пациентов основной группы отмечена тенденция к сокращению времени пребывания в стационаре по сравнению с показателем в контрольной группе. Также после ГБО наблюдалось увеличение сатурации, прощупываемости пульса, реже встречались осложнения, связанные с состоянием культи, зафиксированы больший обхват бедра здоровой ноги, более прочная ампутационная культя и лучшая функциональная способность по адаптированной шкале Наранга и индексу двигательных возможностей (англ. Locomotor Capabilities Index, LCI) [88].

Все упомянутые исследования указывают на эффективность ГБО в восстановлении пациентов после травм. Примечательно, что имеются данные об эффективности ГБО даже в монорежиме, что только подчеркивает целесообразность назначения данного метода лечения при травмах.

Постковидный синдром / Post-COVID syndrome

В двойном слепом клиническом исследовании с фиктивным контролем S. Zilberman-Itskovich et al. (2022 г.) [46] изучили эффективность гипербарической терапии кислородом в восстановлении когнитивных функций у пациентов с постковидным синдромом. Участники основной группы ($n=37$) проходили ГБО (40 сеансов), в контрольной группе ($n=36$) проводилось фиктивное лечение. ГБО способствовала статистически значимому восстановлению общих когнитивных функций, внимания и исполнительных функций ($p=0,038$, $p=0,04$ и $p=0,05$ соответственно). В основной группе наблюдались восстановление сил, улучшение сна, снижение выраженности психиатрических симптомов и болевой интерференции ($p=0,029$, $p=0,042$, $p=0,008$ и $p=0,001$ соответственно). Клиническое улучшение состояния пациентов данной группы сопровождалось значительным улучшением перфузии головного мозга и микроструктурными изменениями в супрамаргинальной извилине, левой дополнительной моторной зоне, правой инсule, левой лобной прецентральной извилине, правой средней лобной извилине и верхней лучистой короне [46].

В рандомизированном двойном слепом исследовании с фиктивным контролем M. Leitman et al. (2023 г.) [89] оценили эффективность ГБО в восстановлении нормальной сердечной деятельности среди пациентов с постковидным синдромом и сниженной глобальной продольной деформацией. Участники основной группы ($n=16$) проходили курс ГБО, тогда как пациенты контрольной группы ($n=13$) получали фиктивное лечение. В основной группе отмечено статистически значимое увеличение глобальной продольной деформации ($p=0,0001$), различия по данному показателю между группами в разных контрольных точках также носили статистически значимый характер ($p=0,041$) [89].

A. Hadanny et al. (2024 г.) [90] в лонгитюдном РКИ проанализировали эффективность гипербарической терапии

кислородом в восстановлении когнитивных способностей пациентов с постковидным синдромом. В основной группе (n=31) проводился курс ГБО (40 сеансов), в группе контроля (n=27) – фиктивное лечение. Среди участников, проходивших ГБО, отмечено общее улучшение качества жизни и качества сна, снижение выраженности нервно-психических симптомов, боли и влияния боли на качество жизни [90].

По данным М. Catalogna et al. (2022 г.) [91], в рандомизированном двойном слепом исследовании с фиктивным контролем показана целесообразность назначения ГБО для восстановления нейронных связей мозга у пациентов с постковидным синдромом. Основная группа (n=37) проходила курс ГБО (40 сеансов), а контрольная группа (n=36) получала фиктивное лечение. У пациентов основной группы отмечены реорганизация и восстановление связей между крупными сетями нейронов, участвующих в когнитивных функциях, в большинстве зон головного мозга. Результаты подтверждены методами функциональной магнитно-резонансной томографии и диффузионной тензорной визуализации [91].

Представленные исследования демонстрируют выраженную эффективность ГБО в восстановлении здоровья пациентов с постковидным синдромом. В то же время работ в данной области сравнительно мало, что связано с относительно небольшим сроком с момента начала пандемии COVID-19, а также с тем, что отдельные клинические исследования, посвященные этому вопросу, пока не завершены или их результаты еще не опубликованы.

Остальные заболевания / Other diseases

D. Huang et al. (2021 г.) [92] в проспективном открытом РКИ оценили эффективность ГБО в терапии пациентов больших кист челюсти. Участники были разделены на три группы. Пациентам 1-й группы (n=29) после энуклеации кисты полость заполняли заменителем костной ткани и назначали курс ГБО в течение 30 дней, во 2-й группе (n=28) лечение было представлено энуклеацией и использованием заменителя костной ткани. У участников 3-й группы (n=28) лечение ограничилось только энуклеацией кисты. Срок наблюдения составил 12 мес. В 1-й группе отмечена частота возникновения инфекции 3,4%, что было статистически значимо ниже, чем во 2-й и 3-й группах (14,3% и 32,1% соответственно; $p<0,05$). Частота случаев репарации тканей в области энуклеации среди пациентов, проходивших ГБО, оказалась статистически значимо выше, чем в остальных группах ($p<0,05$) [92].

С.С. Петриков и др. (2020 г.) [4] провели РКИ, посвященное эффективности ГБО в составе комплексной терапии пациентов с COVID-19. Участники контрольной группы (n=30) получали базовую терапию и при необходимости респираторную поддержку с использованием высокопоточной оксигенотерапии или неинвазивной искусственной вентиляции легких. В основной группе (n=57) в дополнение к указанной поддержке проводилась ГБО. Среди пациентов основной группы отмечены уменьшение одышки, улучшение общего самочувствия. Также у них наблюдалось статистически значимое повышение сатурации крови кислородом по отношению как к исходным значениям, так и к показателям группы контроля ($p<0,05$). ГБО нормализовала процесс апоптоза клеток крови, снижала концентрацию малонового диальдегида в сыворотке крови и не влияла на общую антиоксидантную защиту [4].

В мультицентровом РКИ, выполненном N. Oscarsson et al. (2019 г.) [35], проанализирована способность ГБО снижать выраженность симптомов позднего лучевого цистита. В исследование были включены пациенты, прошедшие лучевую терапию онкологических заболеваний, которых распределили в две группы. Участники контрольной группы (n=38) получали терапию по стандартному протоколу. Пациенты основной группы (n=41) проходили ГБО (30–40 сессий, 5 дней в неделю) в комплексе со стандартным лечением. В основной группе отмечено улучшение состояния пациентов при оценке значений EPIC-26 по сравнению с аналогичным показателем в группе контроля ($p=0,013$) [35].

H. Yildiz et al. (2015 г.) [17] в проспективном одноцентровом однокурсовом открытом РКИ изучили эффективность ГБО в комплексной терапии пациентов с гнойным гидраденитом. Участники (18 мужчин и 25 женщин, средний возраст 35,7 (20–55) года) были распределены в две группы. Основная группа (n=22) получала антибиотическую терапию в комплексе с ГБО, контрольная группа (n=21) – только антибиотическую терапию. Практически у всех пациентов основной группы, в отличие от группы контроля, наблюдалось снижение на $\geq 50\%$ следующих изучаемых показателей на 10-й неделе по сравнению с исходными: оценки по шкале Сарториуса (100% против 76,2%), шкале тяжести гнойного гидраденита (100% против 71,4%), визуальной аналоговой шкале (95,5% против 61,9%), скорость оседания эритроцитов (100% против 71,4%) и уровень С-реактивного белка (72,7% против 66,7%). Различия упомянутых показателей между группами носили статистически значимый характер ($p<0,05$ практически во всех случаях, кроме концентрации С-реактивного белка) [17].

X. Wu et al. (2018 г.) [93] провели метаанализ 7 РКИ с участием 251 пациента для выявления целесообразности назначения гипербарической кислородной терапии пациентам с окклюзией артерии сетчатки. Среди больных, проходивших курс ГБО, отмечено статистически значимое улучшение остроты зрения, в отличие от контрольной группы (различия в 5,61 раза, $p<0,01$). Максимальный терапевтический эффект наблюдался на 3-й месяц курса ГБО и при прохождении более 9 ч лечения ($p<0,05$) [93].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ / CONCLUSION

ГБО по праву можно назвать одним из старейших методов реабилитации с применением технологически сложного оборудования. Начав свое становление в XVIII веке, кислородная терапия в условиях высокого давления остается актуальной и на текущий момент. Технологическое совершенствование оборудования, изучение механизмов действия, эффективности и безопасности данного вида лечения до сих пор являются предметами для исследований и разработок.

Многочисленные зарубежные и отечественные РКИ и их метаанализы, посвященные применению ГБО в терапии и реабилитации пациентов с различными нозологиями, подкрепляют доказательность эффективности этого метода. Безусловно, остаются пробелы в понимании целесообразности использования ГБО в реабилитации и лечении отдельных нозологий. Однако именно они являются обоснованием для дальнейшего изучения тонких механизмов и укрепления доказательной базы с целью расширения показаний к проведению гипербарической кислородной терапии.

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ	ARTICLE INFORMATION
Поступила: 17.02.2025 В доработанном виде: 10.03.2025 Принята к печати: 24.03.2025 Опубликована: 30.03.2025	Received: 17.02.2025 Revision received: 10.03.2025 Accepted: 24.03.2025 Published: 30.03.2025
Вклад авторов	Authors' contribution
Авторы принимали равное участие в сборе, анализе и интерпретации данных. Авторы прочитали и утвердили окончательный вариант рукописи	The authors participated equally in the collection, analysis and interpretation of the data. The authors have read and approved the final version of the manuscript
Конфликт интересов	Conflict of interests
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов	The authors declare no conflict of interests
Финансирование	Funding
Авторы заявляют об отсутствии финансовой поддержки	The authors declare no funding
Этические аспекты	Ethics declarations
Неприменимо	Not applicable
Комментарий издателя	Publisher's note
Содержащиеся в этой публикации утверждения, мнения и данные были созданы ее авторами, а не издательством ИРБИС (ООО «ИРБИС»). Издательство снимает с себя ответственность за любой ущерб, нанесенный людям или имуществу в результате использования любых идей, методов, инструкций или препаратов, упомянутых в публикации	The statements, opinions, and data contained in this publication were generated by the authors and not by IRBIS Publishing (IRBIS LLC). IRBIS LLC disclaims any responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred in the content
Права и полномочия	Rights and permissions
© 2025 Н.Ф. Мирютова, Д.А. Груздева; ООО «ИРБИС» Статья в открытом доступе по лицензии CC BY-NC-SA (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)	© 2025 N.F. Miryutova, D.A. Gruzdeva. Publishing services by IRBIS LLC This is an open access article under CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Зуенкова Ю.А. Организационные аспекты формирования мультидисциплинарных команд: стандарты качества, эффективность и внедрение в практику. *Медицинское образование и профессиональное развитие*. 2022; 13 (3): 32–42. <https://doi.org/10.33029/2220-8453-2022-13-3-32-41>.
Zuenkova Yu.A. Organizational aspects of multidisciplinary teams: quality standards, efficiency and implementation in practice. *Medical Education and Professional Development*. 2022; 13 (3): 32–42 (in Russ.). <https://doi.org/10.33029/2220-8453-2022-13-3-32-41>.
- Амплогова Д.М., Солопова А.Г., Блинов Д.В. и др. Влияние реабилитации на качество жизни пациенток с вульвовагинальной атрофией. *Акушерство, гинекология и репродукция*. 2024; 18 (3): 338–51. <https://doi.org/10.17749/2313-7347/ob.gyn.rep.2024.537>.
Ampilogova D.M., Solopova A.G., Blinov D.V., et al. The impact of rehabilitation on the quality of life of patients with vulvovaginal atrophy. *Obstetrics, Gynecology and Reproduction*. 2024; 18 (3): 338–51 (in Russ.). <https://doi.org/10.17749/2313-7347/ob.gyn.rep.2024.537>.
- Корягина Ю.В., Тер-Акопов Г.Н., Нопин С.В. Возможности применения гипербарической оксигенации в системе медико-биологического сопровождения спорта высших достижений в период интенсивных тренировок в среднегорье (аналитический обзор). *Современные вопросы биомедицины*. 2023; 7 (1): 28. https://doi.org/10.51871/2588-0500_2023_07_01_28.
Koryagina Yu.V., Ter-Akopov G.N., Nopin S.V. Possibilities of using hyperbaric oxygen therapy in biomedical support of high performance sport during intense training in middle altitude (analytical review). *Modern Issues of Biomedicine*. 2023; 7 (1): 28 (in Russ.). https://doi.org/10.51871/2588-0500_2023_07_01_28.
- Петриков С.С., Евсеев А.К., Левина О.А. и др. Гипербарическая оксигенация в терапии пациентов с COVID-19. *Общая реаниматология*. 2020; 16 (6): 4–18. <https://doi.org/10.15360/1813-9779-2020-6-4-18>.
Petricov S.S., Evseev A.K., Levina O.A., et al. Hyperbaric oxygen therapy in patients with COVID-19. *General Reanimatology*. 2020; 16 (6): 4–18 (in Russ.). <https://doi.org/10.15360/1813-9779-2020-6-4-18>.
- Полозова Е.В., Шилов В.В., Богачева А.С., Давыдова Е.В. Оценка эффективности гипербарической оксигенации при острых отравлениях угарным газом. *Токсикологический вестник*. 2016; (3): 33–5. <https://doi.org/10.36946/0869-7922-2016-3-33-35>.
Polozova E.V., Shilov V.V., Bogacheva A.S., Davydova E.V. Evaluation of the effectiveness of hyperbaric oxygenation in acute carbon monoxide poisoning. *Toxicological Review*. 2016; 3: 33–5 (in Russ.). <https://doi.org/10.36946/0869-7922-2016-3-33-35>.
- Miskin B.M., Fox L.A., Abou-Al-Shaar H., et al. Hyperbaric oxygen therapy for the management of mild and moderate traumatic brain injury: a single-center experience. *World Neurosurg*. 2023; 176: e357–70. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2023.05.062>.
- Li X., Lu L., Min Y., et al. Efficacy and safety of hyperbaric oxygen therapy in acute ischaemic stroke: a systematic review and meta-analysis. *BMC Neurology*. 2024; 24 (1): 55. <https://doi.org/10.1186/s12883-024-03555-w>.
- Smolle C., Lindenmann J., Kamolz L., Smolle-Juettner F.M. The history and development of hyperbaric oxygenation (HBO) in thermal burn injury. *Medicina*. 2021; 57 (1): 49. <https://doi.org/10.3390/medicina57010049>.
- Levere T.H. Dr. Thomas Beddoes (1750–1808): science and medicine in politics and society. *Br J Hist Sci*. 1984; 17 (56 Pt 2): 187–204. <https://doi.org/10.1017/s0007087400020914>.
- DDRC Healthcare. History of HBO. Available at: <https://www.ddrc.org/hyperbarics/history-of-hbo/> (accessed 28.11.2024).
- Ninokawa S., Nordham K. Discovery of caisson disease: a dive into the history of decompression sickness. *Proc (Bayl Univ Med Cent)*. 2021; 35 (1): 129–32. <https://doi.org/10.1080/08998280.2021.1967021>.

12. Ortega M.A., Fraile-Martinez O., García-Montero C., et al. A general overview on the hyperbaric oxygen therapy: applications, mechanisms and translational opportunities. *Medicina*. 2021; 57 (9): 864. <https://doi.org/10.3390/medicina57090864>.
13. Choudhury R. Hypoxia and hyperbaric oxygen therapy: a review. *Int J Gen Med*. 2018; 11: 431–42. <https://doi.org/10.2147/IJGM.S172460>.
14. Cannellotto M., Duarte M., Keller G., et al. Hyperbaric oxygen as an adjuvant treatment for patients with COVID-19 severe hypoxaemia: a randomised controlled trial. *Emerg Med J*. 2022; 39 (2): 88–93. <https://doi.org/10.1136/emermed-2021-211253>.
15. Rossignol D.A. Hyperbaric oxygen treatment for inflammatory bowel disease: a systematic review and analysis. *Medical Gas Research*. 2012; 2 (1): 6. <https://doi.org/10.1186/2045-9912-2-6>.
16. Колчина Е.Я., Багаев В.Г., Налбандян Р.Т. Гипербарическая оксигенация в комплексном лечении ран. *Раны и раневые инфекции. Журнал имени проф. Б.М. Костюченко*. 2016; 3 (3): 20–5. <https://doi.org/10.17650/2408-9613-2016-3-3-20-25>.
17. Kolchina E.J., Bagaev V.G., Nalbandjan R.T. Hyperbaric oxygenation in treatment of wound infections. *Wounds and Wound Infections. The prof. B.M. Kostyuchenok Journal*. 2016; 3 (3): 20–5 (in Russ.). <https://doi.org/10.17650/2408-9613-2016-3-3-20-25>.
18. Yildiz H., Senol L., Ercan E., et al. A prospective randomized controlled trial assessing the efficacy of adjunctive hyperbaric oxygen therapy in the treatment of hidradenitis suppurativa. *Int J Dermatol*. 2016; 55 (2): 232–7. <https://doi.org/10.1111/ijd.12936>.
19. Malone M., Bjarnsholt T., McBain A.J., et al. The prevalence of biofilms in chronic wounds: a systematic review and meta-analysis of published data. *J Wound Care*. 2017; 26 (1): 20–5. <https://doi.org/10.12968/jowc.2017.26.1.20>.
20. Kalns J., Lane J., Delgado A., et al. Hyperbaric oxygen exposure temporarily reduces Mac-1 mediated functions of human neutrophils. *Immunol Lett*. 2002; 83 (2): 125–31. [https://doi.org/10.1016/s0165-2478\(02\)00068-8](https://doi.org/10.1016/s0165-2478(02)00068-8).
21. Almzaie A.J., Billington R., Smerdon G., Moody A.J. Effects of hyperbaric oxygen treatment on antimicrobial function and apoptosis of differentiated HL-60 (neutrophil-like) cells. *Life Sci*. 2013; 93 (2-3): 125–31. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2013.06.003>.
22. Thom S.R. Hyperbaric oxygen – its mechanisms and efficacy. *Plast Reconstr Surg*. 2011; 127 (Suppl. 1): 131S–41S. <https://doi.org/10.1097/PRS.0b013e3181fbc2bf>.
23. Wang Y., Ni P., Zhuang D., et al. Early hyperbaric oxygen therapy through regulating the HIF-1 α signaling pathway attenuates Neuroinflammation and behavioral deficits in a mouse model of sepsis-associated encephalopathy. *J Neuroimmunol*. 2024; 391: 578367. <https://doi.org/10.1016/j.jneuroim.2024.578367>.
24. Parra R.S., Lopes A.H., Carreira E.U., et al. Hyperbaric oxygen therapy ameliorates TNBS-induced acute distal colitis in rats. *Med Gas Res*. 2015; 5 (1): 6. <https://doi.org/10.1186/s13618-015-0026-2>.
25. Акалаев Р.Н., Борисова Е.М., Евдокимов Е.А. и др. Гипербарическая медицина: история становления и путь развития. *Вестник экстренной медицины*. 2014; 1: 85–94.
26. Akalaev R.N., Borisova E.M., Evdokimov E.A., et al. Hyperbaric medicine: the history of formation and path of development. *The Bulletin of Emergency Medicine*. 2014; 1: 85–94 (in Russ.).
27. 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; 2: 39–46. <https://doi.org/10.33647/2074-5982-16-2-39-46>.
28. Samoilov A.S., Udalov Yu.D., Sheyanov M.V., et al. Experience in applying hyperbaric oxygen therapy using portable pressure chambers for the treatment of patients with the novel coronavirus infection COVID-19. *Journal Biomed*. 2020; 2: 39–46 (in Russ.). <https://doi.org/10.33647/2074-5982-16-2-39-46>.
29. Fife C.E., Eckert K.A., Carter M.J. An update on the appropriate role for hyperbaric oxygen: indications and evidence. *Plast Reconstr Surg*. 2016; 138 (3 Suppl.): 107S–16S. <https://doi.org/10.1097/PRS.00000000000002714>.
30. Bennett M.H., Mitchell S.J. Emerging indications for hyperbaric oxygen. *Curr Opin Anaesthesiol*. 2019; 32 (6): 792–8. <https://doi.org/10.1097/ACO.0000000000000773>.
31. Левченко П.А., Рычагов Г.П. Результаты консервативного лечения пролежней у больных со спинальной травмой с использованием гипербарической оксигенации. *Медицинский журнал*. 2008; 3: 54–6.
32. Levchenko P.A., Rychagov G.P. Results of conservative treatment of bedsores in patients with spinal trauma using hyperbaric oxygenation. *Medical Journal*. 2008; 3: 54–6 (in Russ.).
33. Nik Hisamuddin N.A.R., Wan Mohd Zahiruddin W.N., Mohd Yazid B., Rahmah S. Use of hyperbaric oxygen therapy (HBOT) in chronic diabetic wound – a randomised trial. *Med J Malaysia*. 2019; 74 (5): 418–24.
34. Мартусевич А.К., Короткова Н.Л., Перетягин П.В., Загреков В.И. Влияние гипербарической оксигенации на состояние микроциркуляции у больных с последствиями ожогов. *Трудный пациент*. 2020; 18 (11–12): 40–3.
35. Martusevich A.K., Korotkova N.L., Peretyagin P.V., Zagrevov V.I. Influence of hyperbaric oxygenation on the state of microcirculation in patients recovering from burn injuries. *Trudnyy patsient*. 2020; 18 (11–12): 40–3 (in Russ.).
36. Ненашев А.А. Разработанный высокоэффективный метод лечения больных с анаэробной инфекцией не подлежит забвению. *Медико-фармацевтический журнал «Пульс»*. 2007; 9 (1): 42–4.
37. Nenashv A.A. The developed highly effective method of treating patients with anaerobic infection is not subject to oblivion. *Medical & Pharmaceutical Journal "Pulse"*. 2007; 9 (1): 42–4 (in Russ.).
38. Levett D.Z., Bennett M.H., Millar I. Adjunctive hyperbaric oxygen for necrotizing fasciitis. *Cochrane Database Syst Rev*. 2015; 2015 (1): CD007937. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD007937.pub2>.
39. Dean S.M., Werman H. Calciphylaxis: a favorable outcome with hyperbaric oxygen. *Vasc Med*. 1998; 3 (2): 115–20. <https://doi.org/10.1177/1358836X9800300205>.
40. Ahmed R., Severson M.A., Traynelis V.C. Role of hyperbaric oxygen therapy in the treatment of bacterial spinal osteomyelitis. *J Neurosurg Spine*. 2009; 10 (1): 16–20. <https://doi.org/10.3171/2008.10.SPI08606>.
41. 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; 20 (11): 1602–14. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(19\)30494-2](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(19)30494-2).
42. Cooper J.S., Hanley M.E. Hyperbaric treatment of radiation proctitis. In: Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 Jan. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK537343/> (accessed 03.02.2025).
43. Васильев И.Т., Мумладзе Р.Б., Якушин В.И. и др. Лечение больных с абдоминальным сепсисом в реанимационном отделении многопрофильного стационара (часть 2). *Московский хирургический журнал*. 2014; 4: 5–15.
44. Vasiliev I.T., Mumladze R.B., Yakushin V.I., et al. Treatment of patients with abdominal sepsis in the intensive care unit of a multidisciplinary hospital (part 2). *Moscow Surgical Journal*. 2014; 4: 5–15 (in Russ.).
45. Керимова У.С. Роль гипербарической оксигенации при синдроме длительного сдавления (СДС) верхней конечности (клинический случай). *Научный вестник академии физической культуры и спорта*. 2021; 3 (4): 63–6. <https://doi.org/10.28942/ssj.v3i4.394>.
46. Kerimova H.S. The role of hyperpressure oxygenation in the syndrome of prolonged compression (SDS) of the upper limb (case case). *Scientific News of Academy of Physical Education and Sport*. 2021; 3 (4): 63–6 (in Russ.). <https://doi.org/10.28942/ssj.v3i4.394>.
47. Miike T., Sakamoto Y., Sakamoto Y., et al. Influence of hyperbaric oxygen therapy on thrombus formation ability in humans.

- Undersea Hyperb Med.* 2020; 47 (4): 591–5. <https://doi.org/10.22462/10.12.2020.8>.
40. Hendriksen S., Cooper J.S. Hyperbaric treatment of central retinal artery occlusion. In: Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 Jan. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK431074/> (accessed 03.02.2025).
 41. Robins M., Hendriksen S., Cooper J.S. Hyperbaric management of frostbite. In: Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 Jan. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK448115/> (accessed 03.02.2025).
 42. Shields R.C. Hyperbaric oxygen therapy for critical limb ischemia. In: Dieter R.S., Dieter R.A. Jr., Dieter R.A. III, Nanjundappa A. (Eds). Critical limb ischemia: acute and chronic. Springer; 2017: 483–9. https://doi.org/10.1007/978-3-319-31991-9_43.
 43. Гребенюк А.Н., Быков В.Н. Оксид углерода: современные подходы к лечению острых отравлений (обзор литературы). *Токсикологический вестник.* 2021; 29 (5): 17–24. <https://doi.org/10.36946/0869-7922-2021-29-5-17-24>.
Grebennyuk A.N., Bykov V.N. Carbon monoxide: modern concepts to the treatment of acute poisonings (literature review). *Toxicological Review.* 2021; 29 (5): 17–24 (in Russ.). <https://doi.org/10.36946/0869-7922-2021-29-5-17-24>.
 44. Lawson-Smith P., Jansen E.C., Hilsted L., et al. Effect of acute and delayed hyperbaric oxygen therapy on cyanide whole blood levels during acute cyanide intoxication. *Undersea Hyperb Med.* 2011; 38 (1): 17–26.
 45. Sun Q., Sun M., Zhang Y., et al. Clinical characteristics of methanol-induced optic neuropathy: correlation between aetiology and clinical findings. *J Ophthalmol.* 2022; 2022: 4671671. <https://doi.org/10.1155/2022/4671671>.
 46. Zilberman-Itskovich S., Catalogna M., Sasson E., et al. Hyperbaric oxygen therapy improves neurocognitive functions and symptoms of post-COVID condition: randomized controlled trial. *Sci Rep.* 2022; 12 (1): 11252. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15565-0>.
 47. Efrati S., Golan H., Bechor Y., et al. Hyperbaric oxygen therapy can diminish fibromyalgia syndrome – prospective clinical trial. *PLoS One.* 2015; 10 (5): e0127012. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0127012>.
 48. Akarsu S., Tekin L., Ay H., et al. The efficacy of hyperbaric oxygen therapy in the management of chronic fatigue syndrome. *Undersea Hyperb Med.* 2013; 40 (2): 197–200.
 49. DuBose K.J., Cooper J.S. Hyperbaric patient selection. In: Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 Jan. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK499820/> (accessed 03.02.2025).
 50. Feldmeier J., Carl U., Hartmann K., Sminia P. Hyperbaric oxygen: does it promote growth or recurrence of malignancy? *Undersea Hyperb Med.* 2003; 30 (1): 1–18.
 51. Gawdi R., Cooper J.S. Hyperbaric contraindications. In: Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 Jan. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK557661/> (accessed 03.02.2025).
 52. Konda P., Holley M., Lakshmanan V.K. Role of hyperbaric oxygen therapy in prostate tumor microenvironment and cancer stem cell niche. *Ann Urol Oncol.* 2024; 7 (4): 185–94. <https://doi.org/10.32948/auo.2024.12.01>.
 53. Ивашков В.Ю., Сопроматдзе С.В., Доколин Р.М. и др. Применение метода гипербарической оксигенации для лечения осложнений после реконструктивных операций в онкологии. *Саркомы костей, мягких тканей и опухоли кожи.* 2022; 1: 46–51.
Ivashkov V.U., Sopromadze S.V., Dokolin R.M., et al. Application of hyperbaric oxygenation in the treatment of complications after reconstructive surgery in oncology. *Bone and Soft Tissue Sarcomas, Tumors of the Skin.* 2022; 1: 46–51 (in Russ.).
 54. Heyboer M., Sharma D., Santiago W., McCulloch N. Hyperbaric oxygen therapy: side effects defined and quantified. *Adv Wound Care.* 2017; 6 (6): 210–24. <https://doi.org/10.1089/wound.2016.0718>.
 55. Jain K.K. Textbook of hyperbaric medicine. Hogrefe & Huber Pub; 2009: 578 pp.
 56. Shupak A., Gilbey P. Effects of pressure. In: Neuman T.S., Thom S.R. (Eds) Physiology and medicine of hyperbaric oxygen therapy. Saunders; 2008: 513–26.
 57. Camporesi E.M. Side effects of hyperbaric oxygen therapy. *Undersea Hyperb Med.* 2014; 41 (3): 253–7.
 58. Skevas T., Baumann I., Bruckner T., et al. Medical and surgical treatment in divers with chronic rhinosinusitis and paranasal sinus barotrauma. *Eur Arch Otorhinolaryngol.* 2012; 269 (3): 853–60. <https://doi.org/10.1007/s00405-011-1742-4>.
 59. Stoetzer M., Kuehlhorn C., Ruecker M., et al. Pathophysiology of barodontalgia: a case report and review of the literature. *Case Rep Dent.* 2012; 2012: 453415. <https://doi.org/10.1155/2012/453415>.
 60. Robichaud R., McNally M.E. Barodontalgia as a differential diagnosis: symptoms and findings. *J Can Dent Assoc.* 2005; 71 (1): 39–42.
 61. Cakmak T., Battal B., Kara K., et al. A case of tension pneumothorax during hyperbaric oxygen therapy in an earthquake survivor with crush injury complicated by ARDS (adult respiratory distress syndrome). *Undersea Hyperb Med.* 2015; 42 (1): 9–13.
 62. Unsworth I.P. Case report. Pulmonary barotrauma in a hyperbaric chamber. *Anaesthesia.* 1973; 28 (6): 675–8. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2044.1973.tb00555.x>.
 63. Lambertsen C.J., Dough R.H., Cooper D.Y., et al. Oxygen toxicity; effects in man of oxygen inhalation at 1 and 3.5 atmospheres upon blood gas transport, cerebral circulation and cerebral metabolism. *J Appl Physiol.* 1953; 5 (9): 471–86. <https://doi.org/10.1152/jappl.1953.5.9.471>.
 64. Torbati D., Church D.F., Keller J.M., Pryor W.A. Free radical generation in the brain precedes hyperbaric oxygen-induced convulsions. *Free Radic Biol Med.* 1992; 13 (2): 101–6. [https://doi.org/10.1016/0891-5849\(92\)90070-w](https://doi.org/10.1016/0891-5849(92)90070-w).
 65. Chavko M., Auker C.R., McCarron R.M. Relationship between protein nitration and oxidation and development of hyperoxic seizures. *Nitric Oxide.* 2003; 9 (1): 18–23. [https://doi.org/10.1016/s1089-8603\(03\)00045-4](https://doi.org/10.1016/s1089-8603(03)00045-4).
 66. Butler F.K. Diving and hyperbaric ophthalmology. *Surv Ophthalmol.* 1995; 39 (5): 347–66. [https://doi.org/10.1016/s0039-6257\(05\)80091-8](https://doi.org/10.1016/s0039-6257(05)80091-8).
 67. Nichols C.W., Lambertsen C. Effects of high oxygen pressures on the eye. *N Engl J Med.* 1969; 281 (1): 25–30. <https://doi.org/10.1056/NEJM196907032810106>.
 68. McMonnies C.W. Hyperbaric oxygen therapy and the possibility of ocular complications or contraindications. *Clin Exp Optom.* 2015; 98 (2): 122–5. <https://doi.org/10.1111/cxo.12203>.
 69. Доценко Э.А., Саливончик Д.П. Современная роль гипербарической оксигенации в терапии кардиоваскулярных заболеваний. *Проблемы здоровья и экологии.* 2010; 3: 58–64. <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2010-7-3-11>.
Dotsenko E.A., Salivonchik D.P. Present-day role of hyperbaric oxygenation in the therapy of cardiovascular diseases. *Health and Ecology Issues.* 2010; 3: 58–64 (in Russ.). <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2010-7-3-11>.
 70. Dekleva M., Neskovic A., Vlahovic A., et al. Adjunctive effect of hyperbaric oxygen treatment after thrombolysis on left ventricular function in patients with acute myocardial infarction. *Am Heart J.* 2004; 148 (4): E14. <https://doi.org/10.1016/j.ahj.2004.03.031>.
 71. Tang X.P., Tan M., Zhang T., et al. Effects of early hyperbaric oxygen therapy on clinical outcome in postoperative patients with intracranial aneurysm. *Undersea Hyperb Med.* 2011; 38 (6): 493–501.
 72. Кукшина А.А., Котельникова А.В., Турова Е.А. и др. Гипербарическая оксигенация в комплексном лечении эмоционального выгорания врачей, связанного с COVID-19. *ДокторРу.* 2022; 21 (4): 47–52. <https://doi.org/10.31550/1727-2378-2022-21-4-47-52>.
Kukshina A.A., Kotelnikova A.V., Turova E.A., et al. Hyperbaric oxygenation in the multimodality therapy of COVID-19-associated emotional burnout in physicians. *Doctor.Ru.* 2022; 21 (4): 47–52 (in Russ.). <https://doi.org/10.31550/1727-2378-2022-21-4-47-52>.

73. Doeniyas-Barak K., Catalogna M., Kutz I., et al. Hyperbaric oxygen therapy improves symptoms, brain's microstructure and functionality in veterans with treatment resistant post-traumatic stress disorder: a prospective, randomized, controlled trial. *PLoS One*. 2022; 17 (2): e0264161. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0264161>.
74. Feng J.J., Li Y.H. Effects of hyperbaric oxygen therapy on depression and anxiety in the patients with incomplete spinal cord injury (a STROBE-compliant article). *Medicine*. 2017; 96 (29): e7334. <https://doi.org/10.1097/MD.0000000000007334>.
75. Efrati S., Fishlev G., Bechor Y., et al. Hyperbaric oxygen induces late neuroplasticity in post stroke patients – randomized, prospective trial. *PLoS One*. 2013; 8 (1): e53716. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0053716>.
76. Hadanny A., Catalogna M., Yaniv S., et al. Hyperbaric oxygen therapy in children with post-concussion syndrome improves cognitive and behavioral function: a randomized controlled trial. *Sci Rep*. 2022; 12 (1): 15233. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19395-y>.
77. Li X., Li J., Yang X., et al. Hyperbaric-oxygen therapy improves survival and functional outcome of acute severe intracerebral hemorrhage. *Arch Med Res*. 2017; 48 (7): 638–52. <https://doi.org/10.1016/j.arcmed.2018.03.001>.
78. Sarabhai T., Mastrototaro L., Kahl S., et al. Hyperbaric oxygen rapidly improves tissue-specific insulin sensitivity and mitochondrial capacity in humans with type 2 diabetes: a randomised placebo-controlled crossover trial. *Diabetologia*. 2023; 66 (1): 57–69. <https://doi.org/10.1007/s00125-022-05797-0>.
79. Ma L., Yong L., Yun Z. Clinical effects of hyperbaric oxygen on hypothyroidism after 131I therapy. *J Radioimmunol*. 2006; 19 (4): 333–5.
80. Henk J.M., Smith C.W. Radiotherapy and hyperbaric oxygen in head and neck cancer. Interim report of second clinical trial. *Lancet*. 1977; 2 (8029): 104–5. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(77\)90117-9](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(77)90117-9).
81. Annane D., Depondt J., Aubert P., et al. Hyperbaric oxygen therapy for radionecrosis of the jaw: a randomized, placebo-controlled, double-blind trial from the ORN96 study group. *J Clin Oncol*. 2004; 22 (24): 4893–900. <https://doi.org/10.1200/JCO.2004.09.006>.
82. Watson E.R., Halnan K.E., Dische S., et al. Hyperbaric oxygen and radiotherapy: a Medical Research Council trial in carcinoma of the cervix. *Br J Radiol*. 1978; 51 (611): 879–87. <https://doi.org/10.1259/0007-1285-51-611-879>.
83. Chiles K.A., Staff I., Johnson-Arbor K., et al. A double-blind, randomized trial on the efficacy and safety of hyperbaric oxygenation therapy in the preservation of erectile function after radical prostatectomy. *J Urol*. 2018; 199 (3): 805–11. <https://doi.org/10.1016/j.juro.2017.10.016>.
84. Niezgoda J.A., Cianci P., Folden B.W., et al. The effect of hyperbaric oxygen therapy on a burn wound model in human volunteers. *Plast Reconstr Surg*. 1997; 99 (6): 1620–5.
85. Millar I.L., Lind F.G., Jansson K.Å., et al. Hyperbaric oxygen for lower limb trauma (HOLLT): an international multi-centre randomised clinical trial. *Diving Hyperb Med*. 2022; 52 (3): 164–74. <https://doi.org/10.28920/dhm52.3.164-174>.
86. Ersoz F., Arıkan S., Sari S., et al. Effect of hyperbaric oxygen treatment on pilonidal disease surgery. *Undersea Hyperb Med*. 2016; 43 (7): 821–5.
87. Беляева К.Л., Диденко Н.В., Загреков В.И. и др. Влияние антиоксидантов, гипербарической оксигенации на оксидативный стресс при тяжелой термической травме: проспективное исследование. *Вестник восстановительной медицины*. 2024; 23 (1): 8–22. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2024-23-1-8-22>.
88. Belyaeva K.L., Didenko N.V., Zagrekov V.I., et al. The effects of antioxidants and hyperbaric oxygenation at severe thermal injury: a prospective study. *Bulletin of Rehabilitation Medicine*. 2024; 23 (1): 8–22 (in Russ.). <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2024-23-1-8-22>.
89. Simanic I., Teofilovski M., Paspalj D., et al. Hyperbaric oxygenation accelerates prosthetic rehabilitation of lower limb amputees. *Undersea Hyperb Med*. 2013; 40 (3): 289–97.
90. Leitman M., Fuchs S., Tyomkin V., et al. The effect of hyperbaric oxygen therapy on myocardial function in post-COVID-19 syndrome patients: a randomized controlled trial. *Sci Rep*. 2023; 13 (1): 9473. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36570-x>.
91. Hadanny A., Zilberman-Itskovich S., Catalogna M., et al. Long term outcomes of hyperbaric oxygen therapy in post covid condition: longitudinal follow-up of a randomized controlled trial. *Sci Rep*. 2024; 14 (1): 3604. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-53091-3>.
92. Catalogna M., Sasson E., Hadanny A., et al. Effects of hyperbaric oxygen therapy on functional and structural connectivity in post-COVID-19 condition patients: a randomized, sham-controlled trial. *Neuroimage Clin*. 2022; 36: 103218. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2022.103218>.
93. Huang D., Li K., Zheng X., Liu L. Hyperbaric oxygen therapy: an effective auxiliary treatment method for large jaw cysts. *Int J Med Sci*. 2021; 18 (16): 3692–6. <https://doi.org/10.7150/ijms.57360>.
94. Wu X., Chen S., Li S., et al. Oxygen therapy in patients with retinal artery occlusion: a meta-analysis. *PLoS One*. 2018; 13 (8): e0202154. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202154>.

Сведения об авторах / About the authors

Мирютова Наталья Федоровна, д.м.н., проф. / **Natalia F. Miryutova**, Dr. Sci. Med., Prof. – ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4046-4008>. eLibrary SPIN-code: 6823-9574. E-mail: mirut@sibmail.com.

Груздева Дарья Александровна / **Daria A. Gruzdeva** – ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7507-6339>.