

И.Б. Ушаков¹, А.О. Пятибрат^{2,3}

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КСЕНОНА ДЛЯ КОРРЕКЦИИ И РЕАБИЛИТАЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ У ЛИЦ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ПРОФЕССИЙ

Государственный научный центр РФ – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна (Россия, Москва, ул. Живописная, д. 46);

Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет (Россия, 194100, Санкт-Петербург, ул. Литовская, д. 2);

Всероссийский центр экстренной и радиационной медицины им. А.М. Никифорова МЧС России (Россия, Санкт-Петербург, ул. Акад. Лебедева, д. 4/2)

Введение. Профессиональная деятельность специалистов, выполняющих задачи в экстремальных условиях (военнослужащие, полицейские, летчики, водолазы, пожарные, спасатели и пр.), вызывает перенапряжение физиологических систем организма, формирование профессионально ускоренных болезней, что может привести к смерти. Оптимизация функционального состояния у специалистов экстремальных профессий является важной задачей.

Цель – анализ перспектив использования ксенона в медицинских целях, в том числе, при оптимизации функционального состояния и работоспособности у специалистов экстремальных профессий.

Методология. Провели поиск научных исследований в реферативно-библиографических базах данных Российского индекса научного цитирования [<https://elibrary.ru/>] и PubMed [<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>] за последние 10 лет.

Результаты и их анализ. Анализ современной литературы по использованию ксенона показывает, что, помимо традиционной анестезиологической сферы, большое количество исследований проведено в области наркологии, в сфере лечения посттравматических стрессовых расстройств, а также для повышения уровня физиологических резервов и работоспособности у специалистов экстремальных профессий. Проанализированные как отечественные, так и зарубежные публикации, к сожалению, не отвечают на важный вопрос о фармакологических механизмах действия ксенона. В некоторых научных исследованиях приводятся пока не подтвержденные гипотезы о вовлечении ионотропных рецепторов глутамата (NMDA-рецепторов) в процесс антиноцицептивных эффектов.

Заключение. Применение ксенона для коррекции и реабилитации у представителей экстремальных профессий является целесообразным и перспективным.

Ключевые слова: ксенон, безопасность, функциональное состояние, работоспособность, экстремальная деятельность, военнослужащий, полицейский, летчик, водолаз, пожарный, спасатель.

Введение

Профессиональная деятельность специалистов экстремальных профессий (военнослужащие, полицейские, летчики, водолазы, пожарные, спасатели и пр.) способствует перенапряжению у них функциональных резервов, возникновению профессионально ускоренных заболеваний, травм или даже смерти.

Оптимизации функционального состояния у специалистов экстремальных профессий посвящены многочисленные исследования. Для этих целей применялись организационные, психофизиологические, фармакологические и другие мероприятия. В ряде случаев требо-

валось провести экстренное восстановление функциональных резервов и работоспособности. Оказалось, что для этих целей может быть использованы ксенон-кислородные смеси.

Цель – анализ перспектив использования ксенона в медицинских целях, в том числе, при оптимизации функционального состояния и работоспособности специалистов экстремальных профессий.

Материал и методы

Провели поиск научных исследований в реферативно-библиографических базах данных Российского индекса научного цитирования

Ушаков Игорь Борисович – д-р мед. наук проф., акад. РАН, гл. науч. сотр., Гос. науч. центр РФ – Федер. мед. биофизич. центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России (Россия, 123098, Москва, ул. Живописная, д. 46), e-mail: ibushakov@gmail.com;

✉ Пятибрат Александр Олегович – д-р мед. наук доц., проф. каф. мобилизационной подготовки здравоохранения и медицины катастроф, С.-Петерб. гос. педиатр. мед. ун-т (Россия, 194100, Санкт-Петербург, ул. Литовская, д. 2); ст. науч. сотр., Всерос. центр экстрен. и радиац. медицины им. А.М. Никифорова МЧС России (Россия, 194044, Санкт-Петербург, ул. Акад. Лебедева, д. 4/2), e-mail: a5brat@yandex.ru

(РИНЦ) [<https://elibrary.ru/>], который формируют сотрудники Научной электронной библиотеки, и PubMed [<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>], обеспечивающий доступ к документам Национальной медицинской библиотеки США за последние 10 лет. При помощи поискового слова «ксенон» создавали массивы документов, в которых искали публикации, посвященные его фармакокинетики и использованию в медицинских целях, в том числе, для оптимизации функционального состояния и повышения работоспособности у специалистов экстремальных профессий.

Результаты и их анализ

Фармакодинамика. Ксенон (лат. xenon, от греч. xenos – чужой), как химический элемент в таблице Д.И. Менделеева, занимает 54-е место в VIII группе, принадлежащей инертным газам. Открытие ксенона произошло в 1898 г. нобелевским лауреатом В. Рамзаем [57]. Его инертность определяется полностью заполненной внешней электронной оболочкой, чем и обусловлена способность не вступать в химические реакции и не подвергаться биотрансформации. Содержание ксенона в атмосферном воздухе ничтожно мало и составляет менее $8,6 \cdot 10^{-5}\%$.

Химически ксенон взаимодействует только со фтором – ядовитые фториды, также с некоторыми органическими веществами и водой образует клараты. В исследованиях Н.Е. Букова показаны существенные дополнения к пониманию строения кларатов и водных ассоциатов и их роли в механизмах ксеноновой анестезии и других лечебных свойств ксенона [18, 19]. Более поздние работы представляют обоснование вовлеченности NMDA-рецепторов в механизмы антиноцицептивной регуляции клинических эффектов ксенона [36] и раскрыты нейропротективные свойства ксенона [24]. Некоторыми исследователями установлено, что ксенон тормозит в коре головного мозга и спинном мозге быстрые ионотропные рецепторы глутамата (AMPA) [2, 72], чем и обусловлен нейропротекторный эффект ксенона [43].

Существует мнение, что анальгезирующий эффект определяется за счет возбуждения ксеноном ГАМК-ергической синаптической передачи и, в то же время, торможения некоторых серотониновых 5-HT-рецепторов [52]. Гипотеза других исследователей о механизмах нейропротекции заключается в способности ксенона изменять состояние дупорного калиевого канала, подобного TWIK-related

K⁺-channel (TREK-1), и при этом возвращать нейрон в неактивное состояние, а также регулировать частоту потенциалов действия [13, 24]. Фармакокинетика обусловлена отсутствием включения ксенона в метаболизм, газ находится в плазме в растворенном состоянии, через 4–5 мин в неизменном виде выводится через легкие, полное выведение ксенона из организма происходит в течение 4 ч.

Результаты ряда исследований свидетельствуют об эффективном использовании ксенона в терапевтической практике, что обусловлено его положительным влиянием на гуморальную регуляцию и обладанием кардио- и нейропротекторными свойствами. Ксенон повышает устойчивость клеток и тканей к гипоксии, а также увеличивает основной обмен.

Имеются сведения о лечении тяжелых заболеваний, что объясняется активацией иммунной системы и противовоспалительными свойствами ксенона. Считается, что иммунопротекторное свойство ксенона обеспечивается активацией ряда антиоксидантных ферментов печени, среди которых ключевую роль играют каталаза, глутатионредуктаза и супероксиддисмутаза. Представлены положительные результаты использования ксенона в онкологии, связанные с ингибированием опухолевого роста [1]. Вполне возможно – в будущем ксенотерапия сможет более широко использоваться для лечения онкологических больных, при этом ожидаемые эффекты представлены снижением частоты рецидивов, образования метастазов, увеличением продолжительности и качества жизни [1, 46].

В некоторых работах представлены данные, свидетельствующие о гемодинамической стабильности и отсутствии кардиотоксического эффекта ксенона. Ксенон нормализует вегетативную регуляцию и не влияет на электрическую активность клеток миокарда и проводящую систему сердца, при этом отмечены его свойства, направленные на повышение коронарного кровотока [46]. Ксенон хорошо сочетается с другими препаратами и не вызывает побочных эффектов. Его неоднократно включали в комплексную терапию при лечении тяжелой сердечно-сосудистой патологии у пациентов с ишемической, гипертонической болезнью, а также в постинфарктном периоде. При использовании ксенона в кардиологической анестезии определялись уменьшение болевого синдрома, сокращение зоны ишемии, поддержание стабильной гемодинамики и гомеостаза, своевременное и эффективно нормализовалась вегетативная функция регуляции

сердечного ритма, восстановились возбудимость и сократимость миокарда [63, 68].

Официально зарегистрированные методические рекомендации в России, разработанные на основе более чем 10-летнего практического опыта по применению ксенона при коррекции функциональных состояний и лечении различных заболеваний в неврологической, психиатрической, наркологической и стоматологической практиках, сгруппированы в публикации [53]:

– Контур терапевтический ксеноновый ингаляционный КТК-01 по ТУ 9444-002-39791733–2009 (ООО «КсеМед», Россия, регистрационное удостоверение № ФСР 2009/06037 от 05.11.2009 г.);

– Комплекс терапевтический ксеноновый НОБИЛИС по ТУ 32.50.21-001-13395690–2017 (ООО «КсеМед», Россия, регистрационное удостоверение № РЗН 2018/4603 от 14.11.2018 г.);

– Лекарственное средство «КсеМед®» (ООО «АКЕЛА-Н», Россия, регистрационный номер ЛС-000121 от 15.02.2010 г.);

– Инструкция по применению препарата «КсеМед®» (ООО «АКЕЛА-Н», Россия, регистрационный номер ЛС-000121-240810);

– Метод коррекции острых и хронических стрессовых расстройств, основанный на ингаляции терапевтических доз медицинского ксенона марки КсеМед® (Институт медико-биологических проблем РАН, Государственный научно-исследовательский испытательный институт Минобороны России, Центральная клиническая больница РАН, регистрационное удостоверение № ФС 2010/227 от 17.10.2010 г.);

– Применение медицинского ксенона при лечении связанных со стрессом психических расстройств невротического уровня (Учебно-научный медицинский центр, Клинический санаторий «Барвиха», Клиническая больница № 1 Управления делами Президента России, ООО «АКЕЛА-Н», утв. 09.10.2014 г., протокол № 6);

– Применение медицинского ксенона при лечении острых и хронических болевых синдромов (Главный военный клинический госпиталь им. акад. Н.Н. Бурденко Минобороны России, ООО «АКЕЛА-Н», утв. 28.07.2015 г.);

– Применение кислородно-ксеноновой смеси при боли и болевых синдромах (ЗАО «Атом – медцентр», регистрационное удостоверение № ФС 2010/123 от 02.04.2010 г.);

– Применение медицинского ксенона при комбинированном обезболивании и седации в амбулаторной стоматологической практике

(Московский государственный медико-стоматологический университет им. А.И. Евдокимова, Академия инновационной стоматологии, ООО «АКЕЛА-Н», утв. 21.04.2015 г.);

– Применение медицинского ксенона в терапии опийного абстинентного синдрома (Федеральный медицинский исследовательский центр психиатрии и наркологии им. В.П. Сербского, Национальный центр наркологии, ООО «АКЕЛА-Н», утв. 14.01.2014 г.);

– Методика терапии гемодинамических расстройств у больных с синдромом отмены алкоголя.

Коротко представим также публикации, раскрывающие наиболее частое использование ксенона в медицинской практике.

Анестезиология. В современной комбинированной анестезии ведущая роль принадлежит внутривенным, неингаляционным анестетикам, а ингаляционные (закись азота, севофлуран, десфлуран, изофлуран, фторотан) – применяют на вводимом этапе и отчасти для поддержания с целью повышения управляемости наркоза [18, 19, 75]. Несмотря на значительные успехи современной анестезиологии, комбинированную анестезию нельзя назвать полностью безопасной. Именно поэтому в поисках наиболее безопасного анестетика профессор кафедры фармакологии Военно-медицинской академии Н.В. Лазарев в первой половине XX в. предсказал наркотические свойства ксенона на основании результатов, полученных в эксперименте с мышонком. В 1951 г. американскими учеными S. Cullen и E. Gross ксенон был впервые использован в качестве анестетика для общего наркоза [70].

В нашей стране ксеноновый наркоз впервые был выполнен профессорами В.П. Смольниковым и Л.Н. Буачидзе в 1962 г. По своим анальгетическим свойствам ксенон в 2 раза превосходит закись азота и обладает лучшей среди всех ингаляционных анестетиков управляемостью [62].

После 1993 г. начались официальные доклинические и клинические испытания ксеноновой анестезии совместно с предприятием ООО «Акела-Н» [49, 53]. На современном этапе анестезия ксеноном проводится с помощью кислородно-ксеноновой смеси с концентрацией ксенона не менее 60–70%, а кислорода – 35–40% [27, 54].

Метаобзор более 300 публикаций, представленных в базах данных Российского индекса научного цитирования и PubMed (1951–1921 гг.), показал, что применение ксенона в качестве основного анестетика у пациентов

пожилого и старческого возраста представляется перспективным с точки зрения его кардиопротективных и нейропротективных свойств. Однако относительная дороговизна ограничивает его применение. Кроме того, эффект ретроградной амнезии ксенона, позволяющий защитить пациента от интраоперационного стресса при непреднамеренном интранаркозном пробуждении, пока не изучен [41].

Высокая стоимость ксенона определяет его экономное расходование, для чего целесообразно использовать аппаратуру, поддерживающую технологию рециклинга [39, 49].

Хорошие результаты получены при использовании ксенона в нейрореанимации, при этом существенно расширены возможности нейрохирургии и увеличена эффективность лечения тяжелой черепно-мозговой травмы и инсультов [23]. Нейропротекторные и антигипоксические эффекты ксенона позволяют применять его при массивной кровопотере в терапии шока [53]. Открываются новые возможности применения ксенона в качестве анестетика при трансплантологических, онкологических, кардиохирургических и травматологических оперативных вмешательствах [1, 51, 73]. Существует побочный эффект, несколько ограничивающий применение ксенона в сравнении с анестезией пропофолом, который заключается в усилении послеоперационного рвотного рефлекса (PONV) [54].

Использование ксенона в хирургии обосновано его обезболивающим эффектом и органопротективным действием на внутренние органы, что очень важно при полостных операциях, особенно на органах брюшной полости, печени, почках и поджелудочной железе [7, 55, 71].

Педиатрия. Одним из часто встречающихся тяжелых расстройств у новорожденных является пренатальная гипоксия, при которой развивается ишемическое поражение мозга, так как для детей до 1 года существуют противопоказания к применению ксенона, исследователи предложили прекодиционировать ксеноном матерей, чтобы снизить вероятность инсультов мозга у новорожденных [70].

Еще одна сфера применения в педиатрии ксенона заключается в коррекции психического состояния при формировании посттравматического стрессового расстройства (ПТСР) у детей после дорожно-транспортного происшествия, а также травм. Результаты исследования показывают, что у детей ингаляции субседативных концентраций ксенона угнетают воспоминания о травматической ситуации во

время непроизвольных рецидивирующих воспоминаний, т.е. флешбэков [6, 56].

Стоматология. Современное амбулаторное стоматологическое лечение, проводимое под комбинированной анестезией с использованием ингаляций ксенон-кислородной смеси, обеспечивает комфортные условия для врача и пациента, эффективное обезболивание и безопасный уровень седации, контролируемой стоматологом [54, 69].

Обзор литературы о применении ксенона в детской стоматологии выполнен с использованием медицинских баз данных PubMed, Scopus, The Cochrane Library, CyberLeninka. Оказалось, что использование в стоматологической практике в качестве ингаляционного анестетика ксенона является перспективным, однако, сведения по его применению у детей ограничены [40].

Неврология. Применение ксенона в неврологии обусловлено нейропротекторными свойствами [48]. Представлены положительные результаты применения ксенона в неврологии и психиатрии в качестве ноотропного, транквилизирующего и антидепрессивного средства [4, 5]. Ксенон был успешно использован при лечении синдрома хронической усталости, стрессовых, депрессивных, невротических, а также различных незначительных когнитивных дисфункциях. Хорошие результаты были получены при купировании астеноневротического синдрома, что особенно важно в постоперационном периоде. Имеются данные о снижении последствий инсультов, черепно-мозговых травм и других органических поражений мозга, несмотря на то, что влияния на восстановление нервной ткани у ксенона не выявлено, его нейропротекторное действие выражается в защите и сохранении нервных клеток [74].

По мнению ряда авторов, ксенотерапию в неврологии целесообразно использовать для лечения острого и хронического стресса, бессонницы, депрессии, невротических расстройств, физического переутомления, вертебральных радикулопатий с выраженным болевым синдромом, мигрени и различных видов гипералгезий. В лечении нервных болезней важным свойством ксенотерапии является хорошая сочетаемость с другими психотропными препаратами, что позволяет существенно снизить их дозировки [62].

Способ лечения стрессовых расстройств, которые могут возникать вследствие различных причин, и устройство для его осуществления представлены в патенте на изобретение

[45]. Проводят ингаляции дыхательной газовой смесью из аппарата, работающего по закрытому дыхательному контуру. При этом на 1-м этапе ингаляцию проводят гелий-кислородной смесью, а на 2-м этапе – гелий-ксенон-кислородной смесью.

Наркология. Получен существенный положительный опыт отечественных неврологов, психиатров и наркологов в купировании абстинентных синдромов у наркозависимых и алкоголиков [3, 8, 9, 26, 47].

Использование ксенонотерапии в наркологии позволяет существенно сократить время лечения абстинентного синдрома по сравнению с ортодоксальными методами [38].

Отечественные исследователи представили результаты применения ксенона в комплексном лечении опиатной зависимости. Полученные данные свидетельствуют об успешном преодолении болевой симптоматики абстинентного синдрома. Применение ксенона позволяет существенно снизить болевые ощущения, восстановить нормальный сон и купировать вегетативные расстройства. Также с помощью этого метода достигаются хорошие результаты в снятии постабстинентного состояния. При опиатной зависимости применение ксенона дает возможность уменьшить лекарственную нагрузку у лиц с патологией печени [60, 61, 64]. К противопоказаниям применения ксенона в наркологии относятся острый период, т.е. наличие интоксикации и психические заболевания в фазе обострения.

Экстремальная медицина. В связи с высокой стоимостью ксенон в большей мере используется в частных медицинских клиниках для пациентов, имеющих возможность оплатить такое лечение. Если учитывать профессиональную роль определенного специалиста, действия которого определяются высокой социальной значимостью, то для реабилитации и восстановления нормальной регуляции функциональных систем организма такого человека применение ксенона было бы вполне оправдано.

Например, способы повышения работоспособности и нормализации функционального состояния организма у спортсменов изложены в изобретениях [56, 58]. При этом ингаляцию газовой смесью ксенона и кислорода осуществляют в комплексе медико-восстановительных мероприятий, корректируя нарушения гомеостаза, адаптацию или утомление от интенсивных физических нагрузок. Ингаляцию проводят с учетом индивидуальных параметров концентрации ксенона в газовой смеси.

Результаты биохимического исследования сыворотки крови у 40 молодых мужчин в возрасте ($23,2 \pm 3,8$) года, занимающихся академической греблей, выявили способность ксенон-кислородных газовых смесей при их курсовом применении стабилизировать мембраны мышечных клеток, повышать их устойчивость к ацидозу и гипоксии, что оптимизировало физическую работоспособность в течение длительного времени. Курс ингаляций ксенон-кислородной смеси после интенсивных тренировок приводил к некоторому увеличению концентрации тестостерона и уменьшению содержания кортизола в плазме крови, тем самым способствует восстановлению физической работоспособности спортсменов после интенсивных физических нагрузок [67].

При обследовании 15 спортсменов высшей спортивной квалификации оказалось, что процедуры ингаляции ксенон-кислородной смесью при помощи портативного аппарата ингаляционного наркоза «КСИН-Аврора» обладают слабым стимулирующим влиянием на сердечно-сосудистую систему преимущественно за счет появления состояния эйфории и комплекса субъективно приятных переживаний. Выявлено также, что эти ингаляции способствуют стабилизации клеточных мембран, снижая, тем самым, выраженность мышечного утомления [20].

Широкомасштабные исследования по использованию ксенона у представителей экстремальных профессий в нашей стране выполнены под руководством Ю.А. Бубеева, А.С. Кальманова и А.В. Потапова.

Например, апробировано действие лекарственного средства «КсеМед®», на которое получена государственная регистрация, созданы мобильные ксеноновые ингаляционные комплексы, позволяющие осуществлять ингаляцию в условиях закрытого контура, уменьшая расход ксенона и повышая экономическую эффективность его применения. Эти комплексы можно использовать в полевых условиях, включая все виды транспорта служб скорой и неотложной медицинской помощи и медицины катастроф [22, 49, 53]. Исследована оценка влияния медицинского ксенона на организм человека, нейропротективных эффектов субнаркотических и наркотических его концентраций с использованием перспективных ингаляционных устройств [23, 51].

В методических рекомендациях, посвященных особенностям применения ксенона для коррекции стрессовых расстройств, раскрыты современные технологии, направленные на оптимизацию функционального состояния

у лиц, выполняющих профессиональные задачи в экстремальных условиях [11, 16]. Определенно положительным моментом является понимание пациентом, подверженного стрессу, возможности без длительного наблюдения и лекарственной терапии пройти курс ксеноно-терапии. Новая технология «Метод коррекции острых и хронических стрессовых расстройств», основанная на ингаляции терапевтических доз медицинского ксенона марки «КсеМед®», получила государственную регистрацию [53].

В проведенном исследовании на добровольцах, деятельность которых строилась по типу напряженной экстремальной реакции, показано: основным результатом ксеноновой терапии является селективное повышение уровня лимфоцитов в крови; ксеноновая коррекция адаптационных реакций организма обследуемых, находящихся в состоянии повышенной активации и переактивации, неэффективна; снижение напряженности в лейкоцитарной формуле носит транзиторный характер и не может использоваться для долговременной коррекции напряженной адаптационной реакции. Ксеноновая терапия оказывала выраженное влияние на результаты психотеста, мало влияя на данные лейкоцита [44].

В то же время, отмечено положительное влияние ксенон-кислородных смесей при коррекции ПТСР у лиц, выполнение профессиональных задач у которых осуществляется в экстремальных условиях.

В связи с тем, что тревога является ведущим компонентом патопсихологического комплекса невротических, связанных со стрессом, расстройств, использование ксенона в санаторном лечении позволяло в краткие сроки провести их коррекцию у лиц опасных профессий, в значительной степени за счет снижения уровня тревоги [28, 30]. В группе пациентов, которые получали лечение ксенон-кислородными смесями, исчезновение патопсихологических проявлений у пациентов с невротическими расстройствами проходило быстрее по сравнению с группой контроля [12].

Объективными показателями редукции патопсихологического симптомокомплекса являются восстановление баланса корково-лимбико-ретикулярных связей, увеличение альфа- и снижение дельта- и тета-диапазона в спектре мощности электроэнцефалографии на фоне возрастания вариативности церебральных процессов [29, 31].

Выдвинута гипотеза, объясняющая снижение тревожности и соматоформной симптоматики применения ингаляций ксенона. Гипоте-

за представляет формирование торможения в гипоталамусе и третьей извилине коры головного мозга, что приводит к подавлению патологических нервных функциональных связей за счет увеличения эффективности микроциркуляторного русла и повышения доставки кислорода [32, 56].

Показано, что при ингаляции ксенона у специалистов экстремальных профессий с ПТСР происходят усиление тормозных процессов и регуляция нейрональной возбудимости в нервной системе путем ослабления NMDA-рецепторного возбуждения и увеличения ГАМК-ергического торможения, что может являться механизмом анксиолитического, противотревожного действия ингаляций ксенона при коррекции ПТСР. Возникают эффективная редукция характерных для ПТСР навязчивых воспоминаний, разрушение старых патологических и создание новых сбалансированных взаимосвязей коры и подкорковых структур [31].

Полученные авторами результаты свидетельствуют о целесообразности применения ксенонотерапии для купирования стрессовых расстройств, а также в качестве одного из компонентов для лечения психогенно обусловленной соматической патологии [66]. Выявленный антистрессорный эффект позволяет применять ксенон в подразделениях МЧС России для купирования острых стрессовых реакций у пострадавших в чрезвычайных ситуациях [65].

Антистрессорное влияние ксенона представляет возможность его использования в реабилитации военнослужащих и других лиц экстремальной деятельности, связанной с длительным отрывом от места постоянной дислокации (подводники, космонавты), а также для подготовки к выполнению профессиональных задач в необычных условиях, например в высокогорье [34, 67].

Терапевтические ксенон-кислородные смеси показали высокую эффективность для восстановления функционального состояния у операторов в эксперименте после 50-часовой депривации сна. В исследовании приняли участие 16 практически здоровых добровольцев, которых в процессе рандомизации случайным образом разделили на 2 группы. Установлено, что в обеих группах операторов отмечалось значимое повышение артериального давления, усиление парасимпатических модулирующих влияний на сердечный ритм и ухудшение когнитивно-мнестических функций. Операторам опытной группы дважды проводили ингаляцию ксенон-кислородные смеси: после окончания эксперимента и на следую-

щий день для изучения отсроченных эффектов ингаляции. На ингаляцию затрачивали 3–4 л ксенона марки «КсеМед®». Проведенный эксперимент показал более быстрое и выраженное восстановление функционального состояния у операторов опытной группы [33].

При изучении влияния курсового применения ксенон-кислородной газовой смеси на функциональное состояние 18 водолазов в процессе интенсивных учебно-тренировочных сборов проводилось плацебо-контролируемое исследование. Оказалось, что курсовое применение ингаляций ксенона поддерживает на высоком уровне функциональные резервы организма водолазов. Полученные результаты позволяют рассматривать ингаляции ксенона как перспективное средство оперативной коррекции функционального состояния [25, 36]. Оказалось также, что использование ксеноновых газовых смесей в составе так называемого «базового реабилитационного комплекса» (аудиовизуальная стимуляция, терапия с биологически обратной связью и контрастные температурные воздействия) существенным образом способствовало восстановлению функционального состояния у операторов подводных технических систем после моделирования интенсивной профессиональной деятельности [35].

При обследовании 19 операторов подводных технических систем в возрасте от 28 до 40 лет изучили функциональное состояние организма перед походом (фон) и после выполнения длительного рабочего цикла в экстремальных условиях. После похода выявлены показатели значительного утомления. Операторов разделили на 2 группы: опытная и контрольная. В опытной группе были проведены коррекционные мероприятия с использованием 5 ежедневных сеансов ксенон-кислородных смесей при помощи аппарата ингаляционно-наркоза «КСИН-Аврора». После коррекции у подводников отмечалось улучшение самочувствия, снижение тревожности, увеличилась подвижность нервных процессов, показатели электроэнцефалографии свидетельствовали об уменьшении эмоциональной возбудимости, нормализации процессов возбуждения и торможения в ЦНС. У лиц контрольной группы в течение профилактического отдыха заметных изменений не выявлено [10].

Описаны случаи положительного влияния ксенон-кислородных смесей для уменьшения утомления у летного состава Военно-транспортной авиации [21]. В период 2007–2009 гг. был проведен комплекс исследований

с участием более 100 добровольцев мужского пола (участники боевых действий, спортсмены-альпинисты, летчики палубной авиации и пр.), средний возраст – $(29,0 \pm 4,2)$ года. В качестве ингалятора использовали портативный ксенон-кислородный терапевтический комплекс (КТК-01) [53]. Выявлено, что ингаляции ксенон-кислородной смеси в соотношении 50:50 сопровождалась у добровольцев выраженной индукцией ряда необычных приятных психических переживаний, которые после окончания процедуры быстро проходили. Обобщение экспериментальных данных свидетельствовало, что субнаркозные ингаляции ксенон-газовой смеси вызывали улучшение функционального состояния у добровольцев по данным самоотчетов и объективных методик [14, 15].

Обнаружены широкие возможности применения ксенона в космической медицине для решения как технических, так и медицинских задач [58, 66], например, для шумовой отолотекции [42] или нейропротекции функционального состояния космонавта [43].

Заключение

После первого применения ксенона в анестезиологической практике лечебное использование этого газа распространилось практически на все сферы медицины. Анализ современной литературы показывает, что, помимо традиционной анестезиологической сферы, большое количество исследований проведено в области наркологии, в сфере лечения посттравматических стрессовых расстройств, а также для повышения уровня физиологических резервов и работоспособности у специалистов экстремальных профессий.

Проанализированные как отечественные, так и зарубежные публикации, к сожалению, не отвечают на важный вопрос о фармакологических механизмах действия ксенона. В некоторых научных исследованиях приводятся пока не подтвержденные гипотезы о вовлечении ионотропных рецепторов глутамата (NMDA-рецепторов) в процесс антиноцицептивных эффектов. Кроме того, учеными раскрыты механизмы формирования кларатов ксенона, и имеются определенные предположения о формировании анальгетического эффекта за счет этих свойств, но как это происходит, пока остается до конца не выясненным и требующим дальнейшего изучения. Тем не менее, применение ксенона для коррекции и реабилитации у представителей экстремальных профессий является целесообразным и перспективным.

Литература

1. Абузарова Г.Р., Хороненко В.Э., Сарманаева Р.Р., Кузнецов С.В. Рандомизированное двойное слепое плацебо-контролируемое исследование ингаляций ксенона в терапии хронической боли в онкологии // Вестн. интенсивной терапии им. А.И. Салтанова. 2020. № 4. С. 48–57. DOI: 10.21320/1818-474X-2020-4-48-57
2. Ананьев В.Н. Рецепторные физиологические механизмы действия инертных газов // Электронный научно-образовательный вестник Здоровье и образование в XXI веке. 2015. Т. 17, № 4. С. 11–12.
3. Аркус М.Л. Применение ксенона в наркологической практике: современные аспекты // Вопр. наркологии. 2020. № 9 (192). С. 75–87. DOI: 10.47877/0234-0623_2020_09_75.
4. Афтанас Л.И., Базанова О.М., Хабаров А.Н. [и др.]. Плацебо-контролируемое исследование влияния ксенона на эмоции и частоту альфа-осцилляций у человека // Вестн. Рос. акад. мед. наук. 2019. Т. 74, № 5. С. 342–350. DOI: 10.15690/vramn1158.
5. Афтанас Л.И., Базанова О.М., Хабаров А.Н., Пустовойт С.М. Психофизиологический анализ тимолептического эффекта ксенона у человека // Бюл. эксперим. биологии и медицины. 2020. Т. 169, № 2. С. 136–140.
6. Багаев В.Г., Амчславский В.Г., Леонов Д.И. Сравнительная оценка антистрессорной активности ксенона и севофлурана при плановых анестезиях у детей // Анестезиология и реаниматология. 2013. № 1. С. 7–9.
7. Багаев В.Г., Митиш В.А., Сабина Т.С. [и др.]. Оценка антистрессорного эффекта субнаркологических концентраций ксенона при лечении тяжелой травмы у детей // Детская хирургия. 2020. Т. 24, № 4. С. 249–255. DOI: 10.18821/1560-9510-2020-24-4-249-255.
8. Барышева О.В., Краузе Л.А. Инертный газ ксенон в лечении наркологических расстройств // Актуальные проблемы психиатрии и наркологии в современных условиях: материалы всерос. науч.-практ. конф. Чита, 2018. С. 18–19.
9. Барышева О.В., Краузе Л.А. Ксенон при лечении пациентов с алкогольной и наркотической зависимостью в период абстинентного синдрома // Актуальные проблемы психиатрии и наркологии в современных условиях: сб. тез. регион. науч.-практ. конф. Чита, 2016. С. 15–17.
10. Блощинский И.А., Галушкина Е.А., Кириллов А.Н. [и др.]. Коррекция функционального состояния операторов подводных технических систем с применением ксенон-кислородной газовой смеси // Экология человека. 2013. № 5. С. 29–35.
11. Бубеев Ю.А., Бояринцев В.В., Базий Н.И. [и др.]. Применение медицинского ксенона при лечении связанных со стрессом психических расстройств невротического уровня: метод. рекомендации. М. : УНМЦ УД Президента России, 2014. 28 с.
12. Бубеев Ю.А., Игошина Т.В., Котровская Т.И. Коррекция связанных со стрессом расстройств у лиц опасных профессий в условиях клинического санатория // Экстрем. деятельность человека. 2016. № 3 (40). С. 25–30.
13. Бубеев Ю.А., Кальманов А.С., Котровская Т.И. Нейрофизиологическое сопровождение процедуры коррекции мотивационных расстройств методом ингаляции человеком субнаркологических доз ксенона // Технол. живых систем. 2010. Т. 7, № 8. С. 58–63.
14. Бубеев Ю.А., Кальманов А.С., Котровская Т.И. Использование субнаркологической ксеноно-кислородной газовой смеси для коррекции функционального состояния у лиц опасных профессий // Медицина катастроф. 2010. № 3 (71). С. 37–41.
15. Бубеев Ю.А., Кальманов А.С., Котровская Т.И. Коррекция функционального состояния летчиков палубной авиации с помощью курса ингаляций терапевтических доз ксенона в условиях дальнего морского похода // Авиакосм. и экол. мед. 2011. Т. 45, № 4. С. 10–15.
16. Бубеев Ю.А., Потапов А.В., Иванов А.В. Методические особенности применения инертного газа ксенона с целью коррекции стрессорных расстройств у лиц опасных профессий // Авиакосм. и экол. мед. 2022. Т. 56, № 3. С. 66–70. DOI: 10.21687/0233-528X-2022-56-3-66-70.
17. Бубнова И.Д., Герасимова Ю.Ю., Ермаков М.А. [и др.]. Сравнительная оценка нейропротективных эффектов субнаркологических и наркотических концентраций медицинского ксенона // Урал. мед. журн. 2017. № 5 (149). С. 109–113.
18. Буров Н.Е. Представления о механизме анестезиологических и лечебных свойствах ксенона // Анестезиология и реаниматология. 2011. № 2. С. 58–62.
19. Буров Н.Е., Потапов В.Н., Макеев Г.Н. Ксенон в анестезиологии: клиничко-экспериментальные исследования. М. : Пульс, 2000. 356 с.
20. Бухтияров И.В., Кальманов А.С., Кисляков Ю.Ю. [и др.]. Исследование возможности применения ксенона в тренировочном процессе для коррекции функционального состояния спортсменов // Лечеб. физкультура и спорт. медицина. 2010. № 6 (78). С. 22–29.
21. Витер А.С. Применение ксенон-кислородных смесей, для профилактики утомления у летного состава военно-транспортной авиации // Медицинские аспекты безопасности полетов : материалы Всеармейской науч.-практ. конф. СПб., 2017. С. 74–76.

22. Вишневский С.А., Потапов В.Н., Буров Н.Е. [и др.]. Мобильный ксеноновый терапевтический комплекс: патент на полезную модель 86104 RU, Заявка № 2009104842/22, 13.02.2009; опубл. 27.08.2009.
23. Герасимова Ю.Ю., Ермаков М.А. Нейропротективные эффекты субнаркологических и наркотических концентраций медицинского ксенона // Вестн. Совета молодых ученых и специалистов Челяб. обл. 2017. Т. 3, № 3 (18). С. 21–24.
24. Гребенчиков О.А., Молчанов И.В., Шпичко А.И. [и др.]. Нейропротективные свойства ксенона по данным экспериментальных исследований // Журн. им. Н.В. Склифосовского Неотложная мед. помощь. 2020. Т. 9. № 1. С. 85–95. DOI: 10.23934/2223-9022-2020-9-1-85-95.
25. Дудельзон В.А., Макаров Е.В., Кальманов А.С. [и др.]. Коррекция функционального состояния водолазов при проведении учебно-тренировочных сборов // Воен.-мед. журн. 2017. Т. 338, № 2. С. 49–56.
26. Дудко Т.Н., Сафина Н.Ф. Ксенон в наркологии // Наркология. 2012. Т. 11, № 2 (122). С. 77–80.
27. Ертемир М.Б. Области применения ксенона и использование дифторида ксенона в медицине // Результаты современных научных исследований и разработок: сб. ст. XIII Всерос науч.-практ. конф. Пенза, 2021. С. 76–78.
28. Игошина Т.В. Психофизиологическое обоснование применения метода ингаляции ксенона при коррекции невротических, связанных со стрессом расстройств у лиц опасных профессий : автореф. дис. ... канд. мед. наук. М., 2017. 25 с.
29. Игошина Т.В., Бубеев Ю.А., Потапов А.В. Применение ксенона при лечении невротических и связанных со стрессом психических расстройств // Клинич. патофизиология. 2014. № 2. С. 48–53.
30. Игошина Т.В., Котровская Т.И., Бубеев Ю.А. [и др.]. Применение ингаляции субнаркологических доз ксенона в санаторном лечении посттравматических стрессовых расстройств // Авиакосм. и экол. мед. 2014. Т. 48, № 5. С. 58–63.
31. Игошина Т.В., Счастливец Д.В., Котровская Т.И., Бубеев Ю.А. Динамика ЭЭГ-паттернов при коррекции стресс реакций методом ингаляции ксенона // Вестн. восстановит. медицины. 2017. № 1 (77). С. 116–121.
32. Кальманов А.С. Коррекция острых стрессовых расстройств у военнослужащих с помощью ингаляции субнаркологических доз ксенона // Воен.-мед. журн. 2008. № 7. С. 37–37.
33. Кальманов А.С., Бубеев Ю.А., Булавин В.В., Котровская Т.И. Коррекция функционального состояния организма операторов с помощью ксеноно-кислородной газовой смеси // Воен.-мед. журн. 2013. Т. 334, № 6. С. 60–61.
34. Кальманов А.С., Бубеев Ю.А., Котровская Т.И. Влияние курсового применения ингаляций ксеноно-кислородной газовой смеси на показатели функционального состояния альпинистов // Лечеб. физкультура и спорт. медицина. 2011. № 3 (87). С. 27–34.
35. Кальманов А.С., Булавин В.В., Ханкевич Ю.Р. [и др.]. Комплексная реабилитация операторов подводных технических систем после моделирования операторской деятельности // Воен.-мед. журн. 2016. Т. 337, № 3. С. 55–63.
36. Кальманов А.С., Макаров Е.В., Шишкин А.Н. [и др.]. Оперативная коррекция функционального состояния водолазов с помощью ингаляций специальных газовых смесей на основе ксенона в процессе учебно-тренировочных сборов // Авиакосм. и экол. мед. 2016. Т. 50, № 3. С. 48–54.
37. Котровская Т.И., Бубеев Ю.А., Счастливец Д.В. Влияние ксенона на посттравматические следы памяти // Авиакосм. и экол. мед. 2019. Т. 53, № 2. С. 13–20. DOI: 10.21687/0233-528X-2019-53-2-13-20.
38. Кузнецов А.В. Применение лечебного ксенонового наркоза в комплексной терапии абстинентных и постабстинентных расстройств у больных алкоголизмом : автореф. дис. ... канд. мед. наук. М., 2008. 23 с.
39. Куликов А.Ю., Кулешов О.В., Лебединский К.М. Доставка кислорода, газовый состав и кислотно-основное состояние артериальной крови во время ксеноновой анестезии по закрытому контуру // Вестн. анестезиологии и реаниматологии. 2017. Т. 14, № 4. С. 32–37.
40. Лазарев В.В., Халиуллин Д.М. Анестезия и ксенон в детской стоматологии // Вестн. анестезиологии и реаниматологии. 2019. Т. 16, № 4. С. 31–37. DOI: 10.21292/2078-5658-2019-16-4-31-37.
41. Лисиченко И.А., Гусаров В.Г. Выбор метода анестезиологического обеспечения у пациентов пожилого и старческого возраста при ортопедических вмешательствах (обзор) // Общ. реаниматология. 2022. Т. 18, № 3. С. 45–58. DOI: 10.15360/1813-9779-2022-3-45-58.
42. Марченко Л.Ю., Сигалева Е.Э. Перспектива использования кислородно-ксеноновых ингаляций в целях шумовой отопротекции и в качестве средства профилактики «неслуховых» эффектов шума // Научное наследие и развитие идей К.Э. Циолковского: материалы 54-х науч. чтений памяти К.Э. Циолковского. Калуга, 2019. С. 91–93.
43. Марченко Л.Ю., Сигалева Е.Э., Мацнев Э.И., Аникеев Д.А. Современные представления о механизмах действия и клиническом применении ингаляций ксенона в целях нейропротекции // Авиакосм. и экол. мед. 2020. Т. 54, № 2. С. 22–29. DOI: 10.21687/0233-528X-2020-54-2-22-29.
44. Назаров Е.И., Вонгай В.Г., Глухенькая Т.А. Озоно-ксеноновая коррекция стресса // Мед. альманах. 2013. № 3 (27). С. 189–192.

45. Наумов С.А., Костромитина Г.Г., Бабилов А.С. Способ лечения стресса и устройство для его осуществления: патент на изобретение № 2524765 RU. МПК А61М 16/12. Заявка № 2012158370/14, заявл. 29.12.2012; опубл. 10.08.2014, Бюл. 22.
46. Николаев Л.Л., Антонов А.А., Буров Н.Е. Гемодинамика при комбинированной ксеноновой анестезии // Мед. алфавит. 2012. Т. 3, № 15. С. 79–82.
47. Новиков Е.М., Булатников А.Н., Соболев Е.С. [и др.]. Место и роль информационно-волнового аналога инертного газа ксенон в лечебно-реабилитационном процессе больных алкоголизмом // Наркология. 2016. Т. 15, № 8 (176). С. 88–93.
48. Новикова М.В. Применение ксенона в терапии психоэмоциональных расстройств // Наука и социум: материалы XIII всерос. науч.-практ. конф. Новосибирск, 2020. С. 143–147.
49. Потапов А.В. Современная ингаляционная аппаратура для противоболевой терапии инертным газом ксеноном // Медицинская техника. 2021. № 6 (330). С. 42–44.
50. Потиевская В.И., Шветский И.М., Кузнецов С.В., Потапов С.В. Современные представления о механизмах действия ксенона на организм человека // Доктор.Ру. 2017. № 6 (135). С. 55–59.
51. Потиевская В.И., Абузарова Г.Р., Сарманаева Р.Р. [и др.]. Влияние ксенон-кислородных ингаляций на функциональное состояние сердечно-сосудистой системы у онкологических пациентов с хроническим болевым синдромом // Исслед. и практика в медицине. 2022. Т. 9, № 3. С. 52–66.
52. Потиевская В.И., Шветский Ф.М., Сидоров Д.В. [и др.]. Оценка влияния ксенона на интенсивность послеоперационного болевого синдрома у онкологических пациентов: рандомизированное исследование // Вестн. интенсивной терапии им. А.И. Салтанова. 2021;3:140–150. DOI: 10.21320/1818-474X-2021-3-140-150.
53. Применение ксенона в клинической практике: сб. метод. рекомендаций / под общ. ред. А.В. Потапова. М.: НКО АСМГ, 2019. 83 с.
54. Рабинович С.А., Заводиленко Л.А., Бабилов А.С. Обезболивание и седация ксенон-кислородной смесью в стоматологии // Стоматология. 2014. Т. 93, № 2. С. 70–73.
55. Раушенбах Н.Г., Багаев В.Г., Амчелавский В.Г. [и др.]. Седанальгезия ксеноном в лечении острого стрессового расстройства у детей с травмой // Детская хирургия. 2021. Т. 25, № S1. С. 61.
56. Рошин И.Н., Шветский Ф.М., Ачкасов Е.Е. [и др.]. Способ повышения работоспособности и нормализации функционального состояния организма человека посредством ксенонотерапии: патент на изобретение № 2580975 RU. МПК А61М 16/00. Заявка № 2014141192/14, заявл. 14.10.2014; опубл. 10.04.2016, Бюл. 10.
57. Сибиркин А.А. Инертные газы // Конспект лекций по курсу неорганической химии. Н. Новгород, 2014. 40 с.
58. Смольников П.В., Шветский Ф.М. Перспективы использования стресслимитирующих эффектов ксенона в общем комплексе обеспечения космических миссий // Агаджанянские чтения: материалы II всерос. науч.-практ. конф. М., 2018. С. 239–241.
59. Советов В.И., Михеев О.П., Андреева Е.С. [и др.]. Способ повышения физической работоспособности человека: патент на изобретение № 2466750 RU. МПК А61М 16/10. Заявка № 2010135259/14, заявл. 23.08.2010; опубл. 27.12.2012, Бюл. 7.
60. Уткин С.И., Атамуратов И.Б., Винникова М.А. [и др.]. Ксенон в терапии опийного абстинентного синдрома // Вопр. наркологии. 2014. № 4. С. 13–28.
61. Филиппова Н.В., Барыльник Ю.Б., Юрова Э.Г. Применение ксенона в терапии зависимых состояний // Наркология. 2019. Т. 18, № 6. С. 92–99. DOI: 10.25557/1682-8313.2019.06.92-99.
62. Хадарцев А.А., Токарев А.Р., Валентинов Б.Г. Ксенон в медицинских технологиях (обзор литературы) // Вестн. нов. мед. технологий [Электронное издание]. 2022. Т. 16, № 4. С. 141–149. DOI: 10.24412/2075-4094-2022-4-3-8.
63. Худяков А.Н., Соломина О.Н., Зайцева О.О., Полежаева Т.В. Традиционные и новые подходы к использованию ксенона в биологии и медицине // Успехи современной биологии. 2017. Т. 137, № 2. С. 195–206.
64. Цыганков Б.Д., Шамов С.А., Рыхлецкий П.З., Давлетов Л.А. Возможности применения ксенона в комплексной терапии психопатологических расстройств у больных наркологического профиля // Рос. мед. журн. 2013. № 4. С. 11–13.
65. Шамов С.А., Цыганков Б.Д., Шуляк Ю.А., Тюнева А.И. Возможность применения ксенона при оказании медицинской помощи пострадавшим в результате катастроф // Медицина катастроф. 2006. № 1-2 (53-54). С. 54–56.
66. Шветский Ф.М., Потиевская В.И., Бугровская О.И. [и др.]. Эндозекологические аспекты адаптационных свойств ксенона и перспективы использования в космической медицине // Агаджанянские чтения: материалы II всерос. науч.-практ. конф. М., 2018. С. 300–301.
67. Шветский Ф.М., Рошин И.Н., Ачкасов Е.Е. [и др.]. Опыт применения ингаляций ксенон-кислородной смеси в общем комплексе медико-восстановительных мероприятий у спортсменов высшего спортивного мастерства // Спортивная медицина: наука и практика. 2014. № 1. С. 80–87.

68. Шпичко А.И., Гребенчиков О.А., Молчанов И.В. [и др.]. Кардиопротективные свойства ксенона // Неотложная мед. помощь. Журн. им. Н.В. Склифосовского. 2020. Т. 9, № 2. С. 264–272. DOI: 10.23934/2223-9022-2020-9-2-264-272.

69. Шугайлов И.А., Юдин Д.К., Московец О.Н., Миргазизов М.З. Премедикация ксенон-кислородной смесью при операциях дентальной имплантации // Рос. вестн. дентальной имплантологии. 2019. № 3-4 (45-46). С. 32–37.

70. Ярыгин Н.В., Шомина Е.А. Применение ксенона в медицинской практике (обзор литературы) // Практик. медицина. 2022. Т. 20, № 4. С. 171–176.

71. Coburn M., Sanders R.D., Maze M. [et al.]. The hip fracture surgery in elderly patients (HIPELD) study to evaluate xenon anaesthesia for the prevention of postoperative delirium: a multicentre, randomized clinical trial // Br. J. Anaesth. 2018. Vol. 120, N 1. P. 127–137. DOI: 10.1016/j.bja.2017.11.015.

72. Dinse A., Georgieff M., Beyer C. [et al.]. Xenon reduces glutamate-, AMPA-, and kainate-induced membrane currents in cortical neurons // Br. J. Anaesth. 2005. Vol. 94, N 4. P. 479–485. DOI: 10.1093/bja/aei080.

73. Dworschak M. Pharmacologic neuroprotection – is xenon the light at the end of the tunnel? // Crit. Care Med. 2008. Vol. 36, N 8. P. 2477–2479. DOI: 10.1097/CCM.0b013e31818113d2.

74. Esencan E., Yuksel S., Tosun Yu. [et al.]. Xenon in medical area: emphasis on neuroprotection in hypoxia and anesthesia // Med. Sas Res. 2013. Vol. 3, N 1. P. 4. DOI: 10.1186/2045-9912-3-4.

75. Hofland J., Ouattara A., Fellahi J.-L. [et al.]. Effect of xenon anesthesia compared to sevoflurane and total intravenous anesthesia for coronary artery bypass graft surgery on postoperative cardiac troponin release: an international, multicenter, Phase 3, single-blinded, randomized noninferiority trial // Anesthesiology. 2017. Vol. 127, N 6. P. 918–933. DOI: 10.1097/ALN.0000000000001873.

76. Yildiz E.P., Ekici B., Tatli B. Neonatal hypoxic ischemic encephalopathy: an update on disease pathogenesis and treatment // Expert. Rev. Neurother. 2017. Vol. 17, N 5. P. 449–459. DOI: 10.1080/14737175.2017.1259567.

Поступила 02.10.2022 г.

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

Вклад авторов: И.Б. Ушаков – методология исследования, подготовка окончательного варианта статьи; А.О. Пятибрат – сбор первичных данных, анализ публикаций, подготовка первого варианта статьи.

Для цитирования. Ушаков И.Б., Пятибрат А.О. Перспективы использования ксенона для коррекции и реабилитации функционального состояния у лиц экстремальных профессий // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. 2022. № 4. С. 40–54. DOI: 10.25016/2541-7487-2022-0-4-40-54.

Prospects of Xenon Application in Functional Recovery and Rehabilitation of Patients Working in Extreme Occupational Environments

Ushakov I.B.¹, Pyatibrat A.O.^{2,3}

¹ State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency (46, Zhivopisnaya Str., Moscow, 123098, Russia);

² St. Petersburg State Pediatric Medical University (2, Litovskaya Str., St. Petersburg, 194100, Russia);

³ Nikiforov Russian Center of Emergency and Radiation Medicine, EMERCOM of Russia (4/2, Academica Lebedeva Str., St. Petersburg, 194044, Russia)

Igor Borisovich Ushakov – Dr. Med. Sci. Prof., Member, Russian Academy of Sciences, Principal Research Associate, State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency (46, Zhivopisnaya Str., Moscow, 123098, Russia), e-mail: ibushakov@gmail.com;

✉ Alexander Olegovich Pyatibrat – Dr. Med. Sci, Associate Prof., Prof. of the Department of Mobilization Training of Health Care and Disaster Medicine, St. Petersburg State Pediatric Medical University (2, Litovskaya Str., St. Petersburg, 194100, Russia); Senior Researcher, Nikiforov Russian Center of Emergency and Radiation Medicine, EMERCOM of Russia (4/2, Academica Lebedeva Str., St. Petersburg, 194044, Russia), e-mail: a5brat@yandex.ru

Abstract

Relevance. Professionals working in extreme environments (army officers, police officers, pilots, divers, firefighters, rescue workers, etc.) are susceptible to overstraining their functional reserves, causing occupational overexposure or even death. It is therefore pivotal to optimize the functional condition of individuals working in extreme occupational environment.

The objective is to analyse the prospects for xenon medical application, including to promote functional optimization and occupational resilience in professionals working in extreme occupational environment.

Methods. The authors studied the research papers published in the Russian Science Citation Index [https://elibrary.ru/] and PubMed [https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov] over the last decade.

Results and Discussion. Current research analysis has revealed numerous investigations regarding xenon application in addiction medicine, treatment of post-traumatic stress disorders, and improvement of physiological reserve and occupational resilience, as well as in anesthesiology. Regrettably, our review of Russian and international publications has failed to answer the pivotal issue regarding pharmacological mechanisms behind xenon action. A few research papers hypothesized without evidence that ionotropic glutamate receptors (NMDA-receptors) might be involved in antinociceptive effects.

Conclusion. Xenon is a promise and can be appropriately applied in the treatment and rehabilitation of individuals working in extreme occupational environments.

Keywords: xenon, safety, functional condition, performance, extreme occupational environment, professionals, police officer, pilot, diver, firefighter, rescue worker.

References

1. Abuzarova G.R., Khoronenko V.E., Sarmanaeva R.R., Kuznetsov S.V. Randomizirovannoe dvoynoe slepoe platsebo-kontroliruemoe issledovanie ingalyatsii ksenona v terapii khronicheskoi boli v onkologii [Double-blind, randomized, placebo-controlled study of xenon in cancer pain therapy]. *Vestnik intensivnoi terapii im. A.I. Saltanova* [Annals of critical care]. 2020; (4):48–57. DOI: 10.21320/1818-474X-2020-4-48-57 (In Russ.)
2. Anan'ev V.N. Retseptornye fiziologicheskie mekhanizmy deistviya inertnykh gazov [Receptor physiological mechanisms action inert gases]. *Elektronnyi nauchno-obrazovatel'nyi vestnik Zdorov'e i obrazovanie v XXI veke* [Online scientific & educational bulletin Zdorove i obrazovanie v XXI veke]. 2015; 17(4):11–12. (In Russ.)
3. Arkus M.L. Primenenie ksenona v narkologicheskoi praktike: sovremennye aspekty [Application xenon in narcological practice: modern aspect]. *Voprosy narkologii* [Journal of addiction problems]. 2020; (9):75–87. DOI: 10.47877/0234-0623_2020_09_75. (In Russ.)
4. Aftanas L.I., Bazanova O.M., Khabarov A.N. [et al.]. Platsebo-kontroliruemoe issledovanie vliyaniya ksenona na emotsii i chastotu al'fa-ostsillyatsii u cheloveka [Placebo-controlled study of xenon effect on the emotions and frequency of the EEG alpha-oscillations]. *Vestnik Rossiiskoi akademii meditsinskikh nauk* [Annals of the Russian academy of medical sciences]. 2019; 74(5):342–350. DOI: 10.15690/vramn1158. (In Russ.)
5. Aftanas L.I., Bazanova O.M., Khabarov A.N., Pustovoit S.M. Psychophysiological analysis of thymoleptic effects of xenon in humans. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*. 2020; 169(2):183–186. (In Russ.)
6. Bagaev V.G., Amcheslavsky V.G., Leonov D.I. Sravnitel'naya otsenka antistressornoj aktivnosti ksenona i sevoflurana pri planovykh anesteziyakh u detei [Xenon and sevoflurane anti stress activity comparative assessment during elective anaesthesia in pediatric patients]. *Anesteziologiya i reanimatologiya* [Russian Journal of Anaesthesiology and Reanimatology]. 2013; (1): 7–9. (In Russ.)
7. Bagaev V.G., Mitish V.A., Sabinina T.S. [et al.]. Otsenka antistressornogo effekta subnarkoticheskikh kontsentratsii ksenona pri lechenii tyazheloi travmy u detei [The antistress effect of xenon in subnarcotic concentrations in children with severe injuries]. *Detskaya khirurgiya* [Pediatric Surgery]. 2020; 24(4):249–255. DOI: 10.18821/1560-9510-2020-24-4-249-255. (In Russ.)
8. Barysheva O.V., Krauze L.A. Inertnyi gaz ksenon v lechenii narkologicheskikh rasstroistv [Xenone inert gas and its curative effect in addictive disorders]. *Aktual'nye problemy psikhiiatrii i narkologii v sovremennykh usloviyakh* [Actual problems of psychiatry and narcology in current research]: Scientific. Conf. Proceedings. Chita. 2018. Pp. 18–19. (In Russ.)
9. Barysheva O.V., Krauze L.A. Ksenon pri lechenii patsientov s alkohol'noi i narkoticheskoi zavisimost'yu v period abstinentsnogo sindroma [Xenone in treatment of alcohol and drug addictions]. *Aktual'nye problemy psikhiiatrii i narkologii v sovremennykh usloviyakh* [Actual problems of psychiatry and narcology in current research] : Scientific. Conf. Proceedings. Chita. 2016. Pp. 15–17. (In Russ.)
10. Bloschinsky I.A., Galushkina E.A., Kirillov A.N. [et al.]. Korrektsiya funktsional'nogo sostoyaniya operatorov podvodnykh tekhnicheskikh sistem s primeneniem ksenon-kislorodnoi gazovoi smesi [Correction of functional state in operators of complicated technical systems by means of xenon-oxygen gas mixture]. *Ekologiya cheloveka* [Human Ecology]. 2013; (5):29–35. (In Russ.)
11. Bubeev Yu.A., Boyarintsev V.V., Bazii N.I. [et al.]. Primenenie meditsinskogo ksenona pri lechenii svyazannykh so stressom psikhicheskikh rasstroistv nevroticheskogo urovnya [Medical xenon in treatment of stress-associated]. Moscow. 2014. 28 p. (In Russ.)
12. Bubeev Yu.A., Igoshina T.V., Kotrovskaya T.I. Korrektsiya svyazannykh so stressom rasstroistv u lits opasnykh professii v usloviyakh klinicheskogo sanatoriya [Correction of stress-related disorders among persons in situations of dangerous professions clinical sanatorium]. *Ekstremal'naya deyatel'nost' cheloveka* [Extreme Human Activity]. 2016; (3):25–30. (In Russ.)
13. Bubeev Yu.A., Kal'manov A.S., Kotrovskaya T.I. Neirofiziologicheskoe soprovozhdenie protsedury korrektsii motivatsionnykh rasstroistv metodom ingalyatsii chelovekom subnarkoticheskikh doz ksenona [Neurophysiologic tracking of rehabilitation xenon inhalation procedure in patients with mental abnormality]. *Tekhnologii zhivyykh system* [Technologies of living systems]. 2010; 7(8):58–63. (In Russ.)
14. Bubeev Yu.A., Kal'manov A.S., Kotrovskaya T.I. Ispol'zovanie subnarkoticheskoi ksenono-kislorodnoi gazovoi smesi dlya korrektsii funktsional'nogo sostoyaniya u lits opasnykh professii [Use of subnarcotic xenon-oxygen gas mixture for correction of functional status of those in hazardous occupations]. *Meditsina katastrof* [Disaster medicine]. 2010; (3):37–41. (In Russ.)
15. Bubeev Yu.A., Kal'manov A.S., Kotrovskaya T.I. Korrektsiya funktsional'nogo sostoyaniya letchikov palubnoi aviatsii s pomoshch'yu kursa ingalyatsii terapevticheskikh doz ksenona v usloviyakh dal'nego morskogo pokhoda [Correction of the functional state of deck aviation pilots by the course of inhalation therapeutic doses of xenon during long march]. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina* [Aerospace and environmental medicine]. 2011; 45(4):10–15. (In Russ.)
16. Bubeev Yu.A., Potapov A.V., Ivanov A.V. Metodicheskie osobennosti primeneniya inertnogo gaza ksenona s tsel'yu korrektsii stressornykh rasstroistv u lits opasnykh professii [Specific features of the method of using noble gas xenon with the purpose to correct stress-induced disorders in people of dangerous occupations]. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina* [Aerospace and environmental medicine]. 2022; 56(3):66–70. DOI: 10.21687/0233-528X-2022-56-3-66-70. (In Russ.)

17. Bubnova I.D., Gerasimova Yu.Yu., Ermakov M.A. [et al.]. Srovnitel'naya otsenka neiroprotektivnykh effektov subnarkoticheskikh i narkoticheskikh kontsentratsii meditsinskogo ksenona [Comparative evaluation of the neuroprotective effects subnarcotic and drug concentrations of medical xenon]. *Ural'skii meditsinskii zhurnal* [Ural Medical Journal]. 2017; (5):109–113. (In Russ.)
18. Burov N.E. Predstavleniya o mekhanizme anesteziologicheskikh i lechebnykh svoystvakh ksenona [Ideas about mechanisms of anesthetic and therapeutic properties of xenon]. *Anesteziologiya i reanimatologiya* [Russian Journal of Anaesthesiology and Reanimatology]. 2011; (2):58–62. (In Russ.)
19. Burov N.E., Potapov V.N., Makeev G.N. Ksenon v anesteziologii: kliniko-eksperimental'nye issledovaniya [Xenone and its application in anesthesiology: experimental clinical trials]. Moscow. 2000. 356 p. (In Russ.)
20. Bukhtiyarov I.V., Kal'manov A.S., Kislyakov Yu.Yu. [et al.]. Issledovanie vozmozhnosti primeneniya ksenona v trenirovochnom protsesse dlya korrektsii funktsional'nogo sostoyaniya sportsmenov [Studying the application of xenon in training process for functional state correction of sportsmen]. *Lechebnaya fizkul'tura i sportivnaya meditsina* [Exercise therapy and Sports Medicine]. 2010; (6):22–29. (In Russ.)
21. Viter A.S. Primeneniye ksenon-kislorodnykh smesei, dlya profilaktiki utomleniya u letnogo sostava voenno-transportnoi aviatsii [Xenon and oxygen gas mixtures to prevent fatigue in military transport pilots]. *Meditsinskie aspekty bezopasnosti poletov* [Medical aspects of flight safety] : Scientific. Conf. Proceedings. St. Petersburg. 2017. Pp. 74–76. (In Russ.)
22. Vishnevsky S.A., Potapov V.N., Burov N.E. [et al.]. Mobile xenon therapeutic complex: utility model patent 86104 RU, Application N 2009104842/22, 13.02.2009; publ. 27.08.2009. (In Russ.)
23. Gerasimova Yu.Yu., Ermakov M.A. Neiroprotektivnye efekty subnarkoticheskikh i narkoticheskikh kontsentratsii meditsinskogo ksenona [Neuroprotective effects of subnarcotic and narcotic concentrations of medical xenon]. *Vestnik Soveta molodykh uchennykh i spetsialistov Chelyabinskoi oblasti* [Annals of the Council of Young Scientists and Specialists of the Chelyabinsk region]. 2017; 3(3):21–24. (In Russ.)
24. Grebenchikov O.A., Molchanov I.V., Shpichko A.I. [et al.]. Neiroprotektivnye svoystva ksenona po dannym eksperimental'nykh issledovaniy [Neuroprotective properties of xenon according to experimental studies]. *Neotlozhnaya meditsinskaya pomoshch. Zhurnal im. N.V. Sklifosovskogo* [Russian Sklifosovsky journal of emergency medical care]. 2020; 9(1):85–95. DOI: 10.23934/2223-9022-2020-9-1-85-95. (In Russ.)
25. Dudel'zon V.A., Makarov E.V., Kal'manov A.S. [et al.]. Korrektsiya funktsional'nogo sostoyaniya vodolazov pri provedenii uchebno-trenirovochnykh sborov [Correction of functional state of divers during training camps]. *Voенно-медитсинский журнал* [Military medical journal]. 2017; 338(2):49–56. (In Russ.)
26. Dudko T.N., Safina N.F. Ksenon v narkologii [Xenon in narcology]. *Narkologiya* [Narcology]. 2012; 11(2):77–80. (In Russ.)
27. Ertemir M.B. Oblasti primeneniya ksenona i ispol'zovanie diftorida ksenona v meditsine [Areas of xenon and xenon difluoride medical application]. *Rezultaty sovremennykh nauchnykh issledovaniy i razrabotok* [Results of contemporary research and development]: Scientific. Conf. Proceedings. Penza. 2021. Pp. 76–78. (In Russ.)
28. Igoshina T.V. Psikhofiziologicheskoe obosnovanie primeneniya metoda ingyalyatsii ksenona pri korrektsii nevroticheskikh, svyazannykh so stressom rasstroystv u lits opasnykh professii [Psychophysiological rationale for the application of xenon inhalations in the treatment of neurotic stress-related disorders in individuals of dangerous occupations]: Abstract dissertation PhD Med. Sci. Moscow. 2017. 25 p. (In Russ.)
29. Igoshina T.V., Bubeev Yu.A., Potapov A.V. Primeneniye ksenona pri lechenii nevroticheskikh i svyazannykh so stressom psikhicheskikh rasstroystv [Xenon application in the treatment of neurotic and stress-related psychotic disorders]. *Klinicheskaya patofiziologiya* [Clinical pathophysiology]. 2014; (2):48–53. (In Russ.)
30. Igoshina T.V., Kotrovskaya T.I., Bubeev Yu.A. [et al.]. Primeneniye ingyalyatsii subnarkoticheskikh doz ksenona v sanatornom lechenii posttraumaticheskikh stressovykh rasstroystv [Practicing subnarcotic xenon dose inhalation in spa treatment of posttraumatic stress-induced disorders]. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina* [Aerospace and environmental medicine]. 2014; 48(5):58–63. (In Russ.)
31. Igoshina T.V., Schastlitsseva D.V., Kotrovskaya T.I., Bubeev Yu.A. Dinamika EEG-patternov pri korrektsii stress reaktzii metodom ingyalyatsii ksenona [EEG dynamics in the elimination of stress reactions by inhalation of xenon]. *Vestnik vosstanovitel'noi meditsiny* [Bulletin of rehabilitation medicine]. 2017; (1):116–121. (In Russ.)
32. Kal'manov A.S. Korrektsiya ostryykh stressovykh rasstroystv u voennosluzhashchikh s pomoshch'yu ingyalyatsii subnarkoticheskikh doz ksenona [Xenon inhalation in subnarcotic doses in the treatment of acute stress disorders in members of the armed forces]. *Voенно-медитсинский журнал* [Military medical journal]. 2008; (7):37–37. (In Russ.)
33. Kal'manov A.S., Bubeev Yu.A., Bulavin V.V., Kotrovskaya T.I. Korrektsiya funktsional'nogo sostoyaniya organizma operatorov s pomoshch'yu ksenono-kislorodnoi gazovoi smesi [Xenon oxygen gas mixture in the treatment of functional disorders in operators]. *Voенно-медитсинский журнал* [Military medical journal]. 2013; 334(6):60–61. (In Russ.)
34. Kal'manov A.S., Bubeev Yu.A., Kotrovskaya T.I. Vliyanie kursovogo primeneniya ingyalyatsii ksenono-kislorodnoi gazovoi smesi na pokazateli funktsional'nogo sostoyaniya al'pinistov [Course application effect of oxygen-xenon gas mixture inhalation on functional status of mountaineers]. *Lechebnaya fizkul'tura i sportivnaya meditsina* [Exercise therapy and Sports Medicine]. 2011; (3):27–34. (In Russ.)
35. Kal'manov A.S., Bulavin V.V., Khankevich Yu.R. [et al.]. Kompleksnaya reabilitatsiya operatorov podvodnykh tekhnicheskikh sistem posle modelirovaniya operatorskoi deyatel'nosti [Complex rehabilitation of operators of submerged technical systems after operating activity modelling]. *Voенно-медитсинский журнал* [Military medical journal]. 2016; 337(3):55–63. (In Russ.)
36. Kal'manov A.S., Makarov E.V., Shishkin A.N. [et al.]. Operativnaya korrektsiya funktsional'nogo sostoyaniya vodolazov s pomoshch'yu ingyalyatsii spetsial'nykh gazovykh smesei na osnove ksenona v protsesse uchebno-trenirovochnykh sborov [Temporary correction of the functional status of divers by inhalation of special xenon-based gas mixtures in the course of instructional and training sessions]. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina* [Aerospace and environmental medicine]. 2016; 50(3):48–54. (In Russ.)
37. Kotrovskaya T.I., Bubeev Yu.A., Schastlitsseva D.V. Vliyanie ksenona na posttraumaticheskie sledy pamyati [Xenon effect on posttraumatic trace memories]. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina* [Aerospace and environmental medicine]. 2019; 53(2):13–20. DOI: 10.21687/0233-528X-2019-53-2-13-20. (In Russ.)

38. Kuznetsov A.V. Primenenie lechebnogo ksenonovogo narkoza v kompleksnoi terapii abstinentnykh i postabstinentnykh rasstroistv u bol'nykh alkogolizmom [Application of curative xenon anesthesia in the comprehensive treatment of alcohol withdrawal and post-acute withdrawal disorders]: Abstract dissertation PhD Med. Sci. Moscow. 2008. 23 p. (In Russ.)
39. Kulikov A.Yu., Kuleshov O.V., Lebedinsky K.M. Dostavka kisloroda, gazovyi sostav i kislotno-osnovnoe sostoyanie arterial'noi krovi vo vremya ksenonovoi anestezii po zakrytomu konturu [Oxygen delivery, gases and acid-base balance of arterial blood during xenon anesthesia of the closed circu]. *Vestnik anesteziologii i reanimatologii* [Messenger of anesthesiology and resuscitation]. 2017; 14(4):32–37. DOI: 10.21292/2078-5658-2017-14-4-32-37. (In Russ.)
40. Lazarev V.V., Khaliullin D.M. Anesteziya i ksenon v detskoj stomatologii [Anesthesia in pediatric dentistry]. *Vestnik anesteziologii i reanimatologii* [Messenger of anesthesiology and resuscitation]. 2019; 16(4):31–37. DOI: 10.21292/2078-5658-2019-16-4-31-37. (In Russ.)
41. Lisichenko I.A., Gusarov V.G. Vybora metoda anesteziologicheskogo obespecheniya u patsientov pozhilogo i starchykh vozrasta pri ortopedicheskikh vmeshatel'stvakh (obzor) [Choice of anesthesia for orthopedic surgery in elderly and senile patients (review)]. *Obshchaya reanimatologiya* [General reanimatology]. 2022; 18(3):45–58. DOI: 10.15360/1813-9779-2022-3-45-58. (In Russ.)
42. Marchenko L.Yu., Sigaleva E.E. Perspektiva ispol'zovaniya kislorodno-ksenonovykh ingyatsii v tselyakh shumovoi otoproteksii i v kachestve sredstva profilaktiki «nesluchovykh» effektivov shuma [Prospects of application xenon and oxygen inhalations in auditory noise protection and prevention of non-auditory noise- induce effects]. *Nauchnoe nasledie i razvitie idei K.E. Tsiolkovskogo* [The Scientific heritage and development of the ideas of K.E. Tsiolkovsky]: Scientific. Conf. Proceedings. Kaluga. 2019. Pp. 91–93. (In Russ.)
43. Marchenko L.Yu., Sigaleva E.E., Matsnev E.I., Anikeev D.A. Sovremennye predstavleniya o mekhanizмах deistviya i klinicheskom primenenii ingyatsii ksenona v tselyakh neiroproteksii [Current view of the action mechanisms and clinical use of xenon inhalations for the purposes of neuroprotection]. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina* [Aerospace and environmental medicine]. 2020; 54(2):22–29. DOI: 10.21687/0233-528X-2020-54-2-22-29. (In Russ.)
44. Nazarov E.I., Vongaj V.G., Glukhen'kaya T.A. Ozono-ksenonovaya korrektsiya stressa [Ozone-xenon correction of stress]. *Meditsinskii al'manakh* [Medical almanac]. 2013; (3):189–192. (In Russ.)
45. Naumov S.A., Kostromitina G.G., Babikov A.S. Method of treating stress and device for implementation thereof: invention patent N 2524765 RU. IPC A61M 16/12Application N 2012158370/14, 29.12.2012; publication 10.08.2014, Bull. N 22.
46. Nikolaev L.L., Antonov A.A., Burov N.E. Gemodinamika pri kombinirovannoi ksenonovoi anestezii [Hemodynamics during combined xenon anesthesis]. *Meditsinskii al'favit* [Medical alfabet]. 2012; 3(15):79–82. (In Russ.)
47. Novikov E.M., Bulatnikov A.N., Sobolev E.S. [et al.]. Mesto i rol' informatsionno-volnovogo analoga inertnogo gaza ksenon v lechebno-reabilitatsionnom protsesse bol'nykh alkogolizmom [The place and role of informational and wave analogue of noble gas the xenon in treatment-and-rehabilitation process of alcoholics]. *Narkologiya* [Narcology]. 2016; 15(8):88–93. (In Russ.)
48. Novikova M.V. Primenenie ksenona v terapii psikhooemotsional'nykh rasstroistv [Application of xenon in the treatment of psycho-emotional disorders]. *Nauka i sotsium* [Science and society]: Scientific. Conf. Proceedings. Novosibirsk. 2020. Pp. 143–147. (In Russ.)
49. Potapov A.V. Sovremennaya ingyatsionnaya apparatura dlya protivobolevoi terapii inertnym gazom ksenonom [Particular qualities of inhalation devices for pain therapy with inert gas xenon]. *Meditsinskaya tekhnika* [Medical appliances]. 2021; (6):42–44. (In Russ.)
50. Potievskaya V.I., Shvetskiy I.M., Kuznetsov S.V., Potapov S.V. Sovremennye predstavleniya o mekhanizмах deistviya ksenona na organizm cheloveka [The Current Understanding of How Xenon Acts in the Human Body]. *Doktor.Ru* [Doctor.ru]. 2017; (6):55–59. (In Russ.)
51. Potievskaya V.I., Abuzarova G.R., Sarmanaeva R.R. [et al.]. Vliyanie ksenon-kislorodnykh ingyatsii na funktsional'noe sostoyanie serdechno-sosudistoi sistemy u onkologicheskikh patsientov s khronicheskim boleвым sindromom [Effect of xenon-oxygen inhalations on functional status of cardiovascular system in oncological patients suffering chronic pain syndrome]. *Issledovaniya i praktika v meditsine* [Research and practical medicine journal]. 2022; 9(3):52–66. DOI: 10.17709/2410-1893-2022-9-3-4. (In Russ.)
52. Potievskaya V.I., Shvetskiy F.M., Sidorov D.V. [et al.]. Otsenka vliyaniya ksenona na intensivnost' posleoperatsionnogo bolevoogo sindroma u onkologicheskikh patsientov: randomizirovannoe issledovanie [Assessment of xenon effect on postoperative pain syndrome severity in oncological patients: a randomized study]. *Vestnik intensivnoi terapii im. A.I. Saltanova* [Annals of critical care]. 2021; 3:140–150. DOI: 10.21320/1818-474X-2021-3-140-150. (In Russ.)
53. Primenenie ksenona v klinicheskoi praktike [Xenon application in clinical practice]. Ed. A.V. Potapov. Moscow. 2019. 83 p. (In Russ.)
54. Rabinovich S.A., Zavodilenko L.A., Babikov A.S. Obezbolivanie i sedatsiya ksenon-kislorodnoi smes'yu v stomatologii [Anesthesia and sedation by admixture of xenon-oxygen in dentistry. Part I]. *Stomatologiya* [Stomatology]. 2014; 93(2):70–73. (In Russ.)
55. Raushenbakh N.G., Bagaev V.G., Amcheslavskii V.G. [et al.]. Sedanal'geziya ksenonom v lechenii ostrogo stressovogo rasstroistva u detei s travmoi [Xenon application for sedation and analgesia in traumatized children with acute stress disorder]. *Detskaya khirurgiya* [Russian Journal of Pediatric Surgery]. 2021; 25(S1):61. (In Russ.)
56. Roshchin I.N., Shvetskiy F.M., Achkasov E.E. [et al.]. Method of increasing efficiency and normalisation of functional state of human body through xenon therapy: invention patent N 2580975 RU. IPC A61M 16/00. Application N 2014141192/14, 14.10.2014; publication 10.04.2016, Bull. N 10. (In Russ.)
57. Sibirkin A.A. Inertnye gazy [Noble gases]. Konspekt lektsii po kursu neorganicheskoi khimii [Notes on inorganic chemistry lectures]. Nizhny Novgorod. 2014. 40 p. (In Russ.)
58. Smol'nikov P.V., Shvetskiy F.M. Perspektivy ispol'zovaniya stresslimitiruyushchikh effektivov ksenona v obshchem komplekse obespecheniya kosmicheskikh missii [Prospects for using xenon stress-sensing effects in the overall space mission support complex]. *Agadzhanyanovskie chteniya* [Agadzhanyan Readings: Scientific. Conf. Proceedings. Moscow. 2018. Pp. 239–241. (In Russ.)
59. Sovetov V.I., Mikheev O.P., Andreeva E.S. [et al.]. Method of increasing performance capability of individual : invention patent N 2466750 RU. IPC A61M 16/10. Application N 2014141192/14, 23.08.2010; publication 27.12.2012, Bull. N 7. (In Russ.)

60. Utkin S.I., Atamuradov I.B., Vinnikova M.A. [et al.]. Ksenon v terapii opiiynogo abstinentnogo sindroma [Xenon in therapy of the opioid withdrawal syndrome]. *Voprosy narkologii* [Journal of addiction problems]. 2014; (4):13–28. (In Russ.)
61. Filippova N.V., Baryl'nik Yu.B., Yurova E.G. Primenenie ksenona v terapii zavisimykh sostoyanii [The use of xenon in the treatment of addictions]. *Narkologiya* [Narcology]. 2019; 18(6):92–99. DOI: 10.25557/1682-8313.2019.06.92-99. (In Russ.)
62. Khadartsev A.A., Tokarev A.R., Valentinov B.G. Ksenon v meditsinskikh tekhnologiyakh (obzor literatury) [Xenon in medical technologies (literature review)]. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy*. [Journal of New Medical Technologies. Electronic resource]. 2022; 16(4):141–149. DOI: 10.24412/2075-4094-2022-4-3-8. (In Russ.)
63. Khudyakov A.N., Solomina O.N., Zaitseva O.O., Polezhaeva T.V. Traditsionnye i novye podkhody k ispol'zovaniyu ksenona v biologii i meditsine [Traditional and new approaches to the use of xenon in biology and medicine]. *Uspekhi sovremennoi biologii* [Advances in contemporary biology]. 2017; 137(2):195–206. (In Russ.)
64. Tsygankov B.D., Shamov S.A., Rykhletsy P.Z., Davletov L.A. Vozmozhnosti primeneniya ksenona v kompleksnoi terapii psikhopatologicheskikh rasstroistv u bol'nykh narkologicheskogo profilya [The possibilities of xenon application in complex therapy of psycho-pathological disorders in patients of narcologic profile]. *Rossiiskii meditsinskii zhurnal* [Medical journal of the Russian Federation]. 2013; (4):11–13. (In Russ.)
65. Shamov S.A., Tsygankov B.D., Shulyak Yu.A., Tyuneva A.I. Vozmozhnost' primeneniya ksenona pri okazanii meditsinskoj pomoshchi postradavshim v rezul'tate katastrof [Possibility of xenon application in medical care delivery to the injured in emergency]. *Meditsina katastrof* [Disaster medicine]. 2006; (1-2):54–56. (In Russ.)
66. Shvetskii F.M., Potievskaya V.I., Bugrovskaya O.I. [et al.]. Endoekologicheskie aspekty adaptatsionnykh svoystv ksenona i perspektivy ispol'zovaniya v kosmicheskoi meditsine [Endoecological aspects of the adaptive properties of xenon and perspectives for implementation in space medicine]. *Agadzhanovskie chteniya* [Agadzhanov Readings]: Scientific. Conf. Proceedings. Moscow. 2018. Pp. 300–301. (In Russ.)
67. Shvetsky F.M., Roshchin I.N., Achkasov E.E. [et al.]. Opyt primeneniya ingyalyatsii ksenon-kislorodnoi smesi v obshchem komplekse mediko-vosstanovitel'nykh meropriyatii u sportsmenov vysshego sportivnogo masterstva [Possibilities of xenon use in training process for functional state correction of athletes // Sports medicine: research and practice]. *Sportivnaya meditsina: nauka i praktika* [Sports medicine: research and practice]. 2014; (1):80–87. (In Russ.)
68. Shpichko A.I., Grebenchikov O.A., Molchanov I.V. [et al.]. Kardioprotektivnye svoystva ksenona [Cardioprotective properties of xenon]. *Neotlozhnaya meditsinskaya pomoshch'. Zhurnal im. N.V. Sklifosovskogo* [Russian Sklifosovsky journal of emergency medical care]. 2020; 9(2):264–272. DOI: 10.23934/2223-9022-2020-9-2-264-272. (In Russ.)
69. Shugailov I.A., Yudin D.K., Moskovets O.N., Mirgazitov M.Z. Premedikatsiya ksenon-kislorodnoi smes'yu pri operatsiyakh dental'noi implantatsii [Premedication with xenon-oxygen mixture during dental implantation operations]. *Rossiiskii vestnik dental'noi implantologii* [Russian bulletin of dental implantology]. 2019; (3-4):32–37. (In Russ.)
70. Yarygin N.V., Shomina E.A. Primenenie ksenona v meditsinskoj praktike (obzor literatury) [Use of xenon in medical practice (literature review)]. *Prakticheskaya meditsina* [Practical medicine]. 2022; 20(4):171–176. (In Russ.)
71. Coburn M., Sanders R.D., Maze M. [et al.]. The hip fracture surgery in elderly patients (HIPELD) study to evaluate xenon anaesthesia for the prevention of postoperative delirium: a multicentre, randomized clinical trial. *Br. J. Anaesth.* 2018; 120(1):127–137. DOI: 10.1016/j.bja.2017.11.015.
72. Dinse A., Georgieff M., Beyer C. [et al.]. Xenon reduces glutamate-, AMPA-, and kainate-induced membrane currents in cortical neurons. *Br. J. Anaesth.* 2005; 94(4):479–485. DOI: 10.1093/bja/aei080.
73. Dworschak M. Pharmacologic neuroprotection – is xenon the light at the end of the tunnel? *Crit. Care Med.* 2008; 36(8):2477–2479. DOI: 10.1097/CCM.0b013e31818113d2.
74. Esencan E., Yuksel S., Tosun Yu. [et al.]. Xenon in medical area: emphasis on neuroprotection in hypoxia and anesthesia. *Med. Sas Res.* 2013; 3(1):4. DOI: 10.1186/2045-9912-3-4.
75. Hofland J., Ouattara A., Fellahi J.-L. [et al.]. Effect of xenon anesthesia compared to sevoflurane and total intravenous anesthesia for coronary artery bypass graft surgery on postoperative cardiac troponin release: an international, multicenter, Phase 3, single-blinded, randomized noninferiority trial. *Anesthesiology*. 2017; 127(6):918–933. DOI: 10.1097/ALN.0000000000001873
76. Yildiz E.P., Ekici B., Tatli B. Neonatal hypoxic ischemic encephalopathy: an update on disease pathogenesis and treatment. *Expert. Rev. Neurother.* 2017; 17(5):449–459. DOI: 10.1080/14737175.2017.1259567.

Received 02.10.2022

For citing: Ushakov I.B., Pyatibrat A.O. Perspektivy ispol'zovaniya ksenona dlya korrektsii i reabilitatsii funktsional'nogo sostoyaniya u lits ekstremal'nykh professii. *Mediko-biologicheskie i sotsial'no-psikhologicheskie problemy bezopasnosti v chrezvychaynykh situatsiyakh*. 2022; (4):40–54. (In Russ.)

Ushakov I.B., Pyatibrat A.O. Prospects of Xenon Application in Functional Recovery and Rehabilitation of Patients Working in Extreme Occupational Environments. *Medico-Biological and Socio-Psychological Problems of Safety in Emergency Situations*. 2022; (4):40–54. DOI: 10.25016/2541-7487-2022-0-4-40-54