

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

EDN: <https://elibrary.ru/xdznqp>DOI: <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-6-417-422>

УДК 57.084.1

© Коллектив авторов, 2023

Макаров А.Ф., Ткачук Ю.В., Шишков А.Ю., Тоньшин А.А.

Искусственный гипобиоз как способ увеличения безопасной продолжительности динамических перегрузок

ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова», пр-т Будённого, 31, Москва, 105275

Динамические перегрузки являются экстремальным фактором рабочего процесса для ряда профессий. Важным негативным последствием динамических перегрузок является нарушение адекватного функционирования центральной нервной системы, возникающее вследствие кислородного голодания тканей из-за гемодинамических нарушений. Известные способы защиты от перегрузок направлены на увеличение максимального значения краткосрочной переносимой перегрузки, но не безопасной её продолжительности. В ряде работ для увеличения максимального значения переносимой перегрузки лабораторных животных переводили в состояние искусственного гипобиоза, отмечено снижение летальности при увеличении перегрузки. Но вопросы о проявлениях нарушений центральной нервной системы и времени восстановления после обнаруженных нарушений, а также изменении безопасной продолжительности динамических перегрузок остаются без ответа.

Цель исследования — оценить изменение безопасной продолжительности динамических перегрузок при использовании искусственного гипобиоза.

В исследовании использовались сирийские хомяки самцы, массой $95,5 \pm 0,5$ г ($M \pm m$). Животные разделены на группы — опытная и контрольная. Для индукции искусственного гипобиоза животным опытной группы осуществляли внутримышечные инъекции суспензии препарата *а-метилдопа*. Контрольная группа получала инъекции 0,9% NaCl. Моделирование динамических перегрузок проводили с использованием центрифуги ($r=0,62$ м). Животные обеих групп были в сознании, активный вектор перегрузки — голова-таз. В течение 10 секунд (с) осуществляли увеличение скорости вращения центрифуги до заданного расчётного значения величины перегрузки, G : 30 (угловая скорость (ω) = 21,79 рад/с), 40 (ω = 25,16 рад/с) или 70 (ω = 33,28 рад/с). Экспозиция при заданной величине перегрузки в течение установленного времени, с: 20, 50, 80, 110 или 140. После полной остановки в течение 10 с оценивали общее состояние животных, наличие травм, кровоизлияний, наличие дыхательных движений, сердечных сокращений. Проводили наблюдение за выжившими животными, оценивали наличие сознания, определяли нарушение координации по следующим критериям: положение животного, наличие продуктивного движения, шаткость походки, движение по окружности, запрокидывание на бок; определяли время восстановления координации. Животных наблюдали в течение последующих суток для оценки суточной выживаемости. Погибшим животным проводили некропсию.

Выживаемость в контрольной группе: 30 G: 80 с — 5/6; 40 G: 20 с — 6/6, 50 с — 6/6, 80 с — 3/6; 70 G: 20 с — 6/6, 50 с — 4/6, 80 с — 0/10. Выживаемость в опытной группе: 70 G: 50 с — 6/6, 80 с — 10/10, 110 с — 10/10, 140 с — 2/6. После перегрузки 70 G 50 с у животных опытной группы нарушения координации слабо выражены, время восстановления координации $1,8 \pm 0,3$ с, у животных контрольной группы нарушения оценивались как значительные, время восстановления — $4,5 \pm 0,3$ с, что в 2,5 раза ($p < 0,01$) больше.

На следующие сутки у 3 животных контрольной группы 40 G 80 с сохранялся тремор. У остальных животных всех групп каких-либо нарушений координации или особенностей не обнаружено.

Ни у одного животного не наблюдалось внешних повреждений. При некропии повреждений органов или скелета не обнаружено. По результатам гистологического исследования нарушения целостности тканей не выявлено.

Доказано увеличение в 5,5 раза времени безопасного пребывания животных в состоянии искусственного гипобиоза при динамических перегрузках. Отмечено снижение времени восстановления координации у животных в состоянии искусственного гипобиоза в 2,5 раза.

Этика. Исследования с участием лабораторных животных проходили с соблюдением необходимых нормативных актов (Хельсинкской декларации 2000 г. о гуманном отношении к животным и «Правилами проведения работ с использованием экспериментальных животных» (Приказ Минздрава СССР № 755 от 12.08.1977 г.)). Протокол исследования был одобрен этическим комитетом ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова».

Ключевые слова: перегрузки; циркуляторная гипоксия; искусственный гипобиоз; гипометаболическое состояние; искусственная спячка

Для цитирования: Макаров А.Ф., Ткачук Ю.В., Шишков А.Ю., Тоньшин А.А. Искусственный гипобиоз как способ увеличения безопасной продолжительности динамических перегрузок. *Мед. труда и пром. экол.* 2023; 63(6): 417–422. <https://elibrary.ru/xdznqp> <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-6-417-422>

Для корреспонденции: Макаров Артур Феликсович, научный сотрудник лаборатории токсикологии, ФГБНУ «НИИ МТ». E-mail: artmakf@yandex.ru

Участие авторов:

Макаров А.Ф. — концепция и дизайн исследования, сбор и обработка данных, написание текста;

Ткачук Ю.В. — сбор и обработка данных;

Шишков А.Ю. — разработка и обеспечение работы экспериментального стенда;

Тоньшин А.А. — редактирование.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Дата поступления: 11.05.2023 / Дата принятия к печати: 01.06.2023 / Дата публикации: 12.06.2023

Arthur F. Makarov, Yulia V. Tkachuk, Anatoly Yu. Shishkov, Anton A. Tonshin

Artificial hypobiosis as a method of G-force negative impact reduction

Izmerov Research Institute of Occupational Health, 31, Budyonnogo Ave., Moscow, 105275

Dynamic gravitational acceleration, known as a G-force, is an extreme factor for some professions. G-force negative impact realizes in central nervous system adequate functioning disturbance, resulting from oxygen starvation of tissues due to hemodynamic disorders. Known methods of G-force protection are aimed at increasing the maximum short-term G-force value, but not its total safe duration. In a number of studies, in order to increase the maximum value of the tolerated overload, we introduced laboratory animals into a state of artificial hypobiosis. The authors noted a decrease in mortality with an increase in the maximum value of the overload force. There were no data on manifestations of disorders of the central nervous system and recovery time, as well as changes in the safe duration of overload.

The study aims to assess the change in the safe G-force duration while artificial hypobiosis.

Scientists have used Syrian male hamsters weighing 95.5 ± 0.5 g ($M=m$) in the study. We have divided the animals into groups — experimental and control.

To induce artificial hypobiosis, the researchers administered intramuscular injections of a suspension of α -methyl dopa to animals of the experimental group. The control group received of 0.9% NaCl. We have carried out dynamic gravitational acceleration modeling using a centrifuge ($r=0.62$ m). The animals of both groups were conscious, with positive G-forces pointing downward (head-pelvis).

Within 10 seconds (s), the centrifuge rotation speed was increased till the chosen G-force value, G: 30 (angular velocity (ω)=21.79 rad/s), 40 (ω =25.16 rad/s) or 70 (ω =33.28 rad/s). G-force exposure set time, s: 20, 50, 80, 110 or 140. After a complete stop for 10 seconds, the general condition of the animals, injuries, hemorrhages, breathing, heart contractions were assessed. We monitored the surviving animals, assessed consciousness, determined coordination disorders in accordance with the following criteria: animal posture, productive movement, unstable gait, circular motion, reclining on the side. The time of restoration of coordination was also determined. The researchers have observed the animals during the following days to assess the daily survival rate. Necropsy was performed on all non-surviving animals.

Survival in the control group: 30 G: 80 s — 5/6; 40 G: 20 s — 6/6, 50 s — 6/6, 80 s — 3/6; 70 G: 20 s — 6/6, 50 s — 4/6, 80 s — 0/10. Survival in the experimental group: 70 G: 50 s — 6/6, 80 s — 10/10, 110 s — 10/10, 140 s — 2/6.

After acceleration of 70 G 50 s in animals of the experimental group, coordination disorders were weakly expressed, the coordination recovery time was 1.8 ± 0.3 s, in animals of the control group, violations were assessed as significant, the recovery time was 4.5 ± 0.3 s, which is 2.5 times ($p < 0.01$) more.

On the following day, tremor persisted in 3 animals of the control group 40 G 80 c. In the remaining animals of all groups, no coordination disorders or peculiarities were detected.

We did not find any external injuries in any animal. Also, the scientists did not reveal a violation of the integrity of tissues according to the results of histological examination.

The authors have proved a 5.5-fold increase in the time of safe stay of animals in a state of artificial hypobiosis during dynamic overloads. There was a 2.5-fold decrease in the coordination recovery time in animals in a state of artificial hypobiosis.

Ethics. Studies involving laboratory animals were conducted in compliance with the necessary regulations (the Helsinki Declaration of 2000 on Humane Treatment of Animals and the "Rules for carrying out work using experimental animals" (Order of the Ministry of Health of the USSR No. 755 of 12.08.1977)). The Ethics Committee of Izmerov Research Institute of Occupational Health approved the protocol of the study.

Keywords: g-force; acceleration; circulatory hypoxia; aerospace medicine

For citation: Makarov A.F., Tkachuk Yu.V., Shishkov A.Yu., Tonshin A.A. Artificial hypobiosis as a method of g-force negative impact reduction. *Med. truda i prom. ekol.* 2023; 63(6): 417–422. <https://elibrary.ru/xdznqp> <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-6-417-422> (in Russian)

For correspondence: Arthur F. Makarov, research associate of toxicology laboratory at the Izmerov Research Institute of Occupational Health. E-mail: artmakf@yandex.ru

Information about the author: Makarov A.F. <https://orcid.org/0000-0002-0146-3862>

Contribution:

Makarov A.F. — research concept and design, data collection and processing, writing the text;

Tkachuk Yu.V. — data collection and processing;

Shishkov A.Yu. — development and maintenance of the experimental stand;

Tonshin A.A. — editing.

Funding. The study had no funding.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Received: 11.05.2023 / Accepted: 01.06.2023 / Published: 12.06.2023

Динамические перегрузки являются экстремальным фактором рабочего процесса для ряда профессий таких, как пилоты и испытатели летательных аппаратов, в т. ч. космических кораблей. Перегрузки величиной 5–6 G, вектор «голова–таз» достаточно, чтобы гидростатическое суммарное давление на уровне головы упало до нуля, при этом венозное и артериальное давление в нижней половине тела растут пропорционально величине перегрузки, что приводит к перераспределению объёмов крови с последующим её депонированием, уменьшением венозного притока к правому сердцу, падением минутного объёма и

объёма циркулирующей крови¹ [1]. Гемодинамические изменения реализуется в виде циркуляторной гипоксии, выраженность которой зависит от степени несоответствия потребности тканей в кислороде и его доставке. Наиболее важным негативным последствием динамических перегрузок является нарушение адекватного функционирования центральной нервной системы, возникающее вследствие кислородного голодания тканей. Ишемические наруше-

¹ Патифизиология. Учебник для слушателей и курсантов военно-медицинской академии и военно-медицинских институтов. Под ред. проф. В.Ю. Шанина. СПб: ВМедА. 2004.

ния характерны для перегрузок любого типа, и тем больше выражены, чем дольше организм им подвержен. Все временные показатели переносимости зависят от индивидуальных для каждого организма адаптационных резервов. Основным критерием при определении переносимости перегрузок у человека является сохранение сознания [2, 3]. После потери сознания до достижения безопасной величины перегрузки проходит ещё какое-то время, за которое могут происходить необратимые нарушения функций центральной нервной системы. Продолжительность ишемии является критическим фактором, оказывающим непосредственное влияние на степень дальнейшего восстановления центральной нервной системы. Для человека экспериментально определены величины перегрузок, которые приводят к потере сознания [1–4], но безопасная продолжительность воздействия не установлена. Известны пределы переносимости перегрузок для мелких лабораторных животных (крыс), где основным критерием является летальность — 5-минутная экспозиция при величине перегрузки 30–35 G вызывает гибель $\frac{2}{3}$ животных [4, 5]. Данных по безопасной продолжительности и оценке восстановления функции ЦНС в свободном доступе нет.

В перспективе развития пилотируемых полётов на Марс, являющихся самым актуальным направлением в 21 веке, а также к более далёким участкам нашей солнечной системы, космонавты будут испытывать не только высокие, но и весьма продолжительные динамические перегрузки, связанные как с увеличением скорости перелётов, так и необходимостью более интенсивного торможения. Эти факторы являются основополагающими для развития новых способов и систем защиты организма. Известные способы защиты от перегрузок направлены на увеличение максимального значения краткосрочной переносимой перегрузки [1–4], но не безопасной её продолжительности. В ряде работ Н.Н. Тимофеева и соавторов для увеличения максимального значения переносимой перегрузки у мелких лабораторных животных осуществляли снижение уровня метаболизма — переводили организм в состояние искусственного гипобиоза [5]. Авторами был получен положительный эффект в виде снижения летальности при увеличении перегрузки. Но вопросы о проявлениях нарушений центральной нервной системы и времени восстановления после развития нарушений, а также изменении безопасной продолжительности динамических перегрузок остаются без ответа, в связи с чем была проведена данная научная работа.

Цель исследования — целью настоящей работы является изучение изменения безопасной продолжительности динамических перегрузок при использовании искусственного гипобиоза.

Исследование проводили в помещении со средней температурой воздуха $+25^{\circ}\text{C}$ и средней влажностью 50%. В исследовании использовались сирийские хомяки самцы массой $95,5 \pm 0,5$ г ($M \pm m$). Животные были разделены на 2 основные группы: опытная — животные в состоянии искусственного гипобиоза, контрольная — интактные животные. Для индукции состояния искусственного гипобиоза опытной группе осуществляли внутримышечные инъекции суспензии фармакологической субстанции α -метилдопа (*Methyl dopa*; CAS Number 555-30-6) из расчёта 1 г/кг [4] в растворе 0,3 г/кг диметилсульфоксида (ДМСО) и 1,7 г/кг 0,9% NaCl. Контрольная группа получала внутримышеч-

ные инъекции раствора 0,3 г/кг ДМСО и 1,7 г/кг 0,9% NaCl в эквивалентном объёме.

Для создания модели воздействия динамических перегрузок был разработан и собран экспериментальный стенд — центрифуга, $r=0,62$ м. Активный вектор перегрузки — голова-таз.

Через 3 часа с момента инъекции каждое животное помещали в испытательную капсулу, представляющую из себя полый цилиндр с ограниченным внутренним пространством для исключения изменения положения животного. Животные обеих групп были в сознании. По две испытательные капсулы фиксировали на экспериментальной центрифуге, с противоположных сторон размещали противовесы. В течение 10 секунд (с) осуществляли увеличение скорости вращения центрифуги до заданного расчётного значения величины перегрузки G : 30 (угловая скорость (ω)=21,79 рад/с), 40 (ω =25,16 рад/с) или 70 (ω =33,28 рад/с). Проводили экспозицию при заданной величине перегрузки в течение установленного времени, с: 20, 50, 80, 110 или 140.

Общий вид эксперимента изображён на **рисунке 1**.

По окончании экспозиции происходила пассивная остановка вращения центрифуги в течение 10 с. После полной остановки испытательные капсулы отсоединяли от центрифуги, извлекали животных, оценивали общее состояние, наличие травм, кровоизлияний, наличие дыхательных движений, сердечных сокращений. Исход признавался летальным по отсутствию самостоятельных дыхательных движений у животных в течение 3-минутного визуального наблюдения после извлечения из испытательной капсулы. Каждому животному с летальным исходом проводилось патологоанатомическое вскрытие с целью установления наличия повреждений внутренних органов и скелета. По одному образцу тканей головного мозга, печени и миокарда от каждого животного после патологоанатомического вскрытия передавалось на гистологическое исследование. После извлечения из испытательной капсулы проводили наблюдение за выжившими после эксперимента животными,

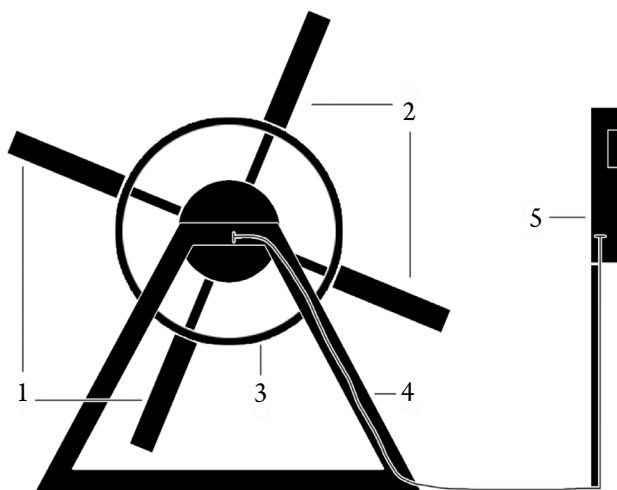


Рис. 1. Общий вид экспериментального стенда. Представлен вид сверху.

Примечания: 1 — капсулы для размещения лабораторных животных; 2 — противовесы; 3 — ротор; 4 — кронштейн со статормом; 5 — блок управления центрифугой.

Fig. 1. General view of the experimental stand. A top view.

Note: 1 — capsules for placing laboratory animals; 2 — counterweights; 3 — rotor; 4 — bracket with stator; 5 — centrifuge control unit.

оценивали наличие сознания, определяли нарушение координации по следующим критериям: положение животного, наличие продуктивного движения, шаткость походки (колебательные движения тела при продуктивном движении), движение по окружности, запрокидывание на бок. Для оценки нарушения координации была разработана классификация на основании наблюдаемых признаков:

- слабо выражено — естественная поза, успешное восстановление позы при ротации, шаткость походки, отсутствие других особенностей;
- умеренное — естественная поза, попытки восстановления позы при ротации, шаткость походки и наличие одной, нескольких или всех особенностей: движение по окружности, запрокидывание набок;
- значительное — неестественное положение на спине, боку или животе, отсутствие реакции при ротации, беспорядочные движения конечностями, сгибание-разгибание туловища, отсутствие продуктивного движения.

Оценивали время восстановления координации. Критериями восстановления координации считали отсутствие нарушений в походке и каких-либо особенностей при двигательной активности после физической стимуляции.

Все животные находились под видеонаблюдением в течение последующих суток для оценки суточной выживаемости.

Основные оцениваемые показатели и расчётные соотношения: величина перегрузки (G); время воздействия перегрузки (c); восстановление координации (c); выживаемость (%).

Расчёты и статистическую обработку результатов эксперимента проводили с помощью программного обеспечения *Microsoft Office Excel 2019*, статистический анализ проводился методом сравнения средних значений с использованием двухвыборочного t -критерия Стьюдента для независимых выборок. Наличие взаимосвязей определяли с использованием корреляционного анализа.

Общая оценка состояния животных контрольной и опытной групп, а также выживаемость представлены в *таблице*.

Таблица / Table

Общее состояние лабораторных животных и выживаемость в зависимости величины линейной перегрузки («голова–таз») и её длительности

The general condition of laboratory animals and survival depending on the magnitude of linear overload ("head–pelvis") and its duration

Группа	Параметры						
	Величина перегрузки, G	Продолжительность перегрузки, c	Выживаемость, % (n/N)	Сознание, активность	Характер дыхания	Нарушение координации ⁺	Восстановление координации, мин
Контроль	30	80	83 (5/6)	Нет	Редкое, Глубокое	Значительное	5,4±0,3
	40	20	100 (6/6)	Активное	Частое, Поверхностное	Слабо выражено	0,7±0,2
		50	100 (6/6)	Вялое	Частое, Глубокое	Умеренное	3,3±0,5
		80	50 (3/6)	Нет	Редкое, Глубокое	Значительное	7,0±0,7
	70	20	100 (6/6)	Вялое	Частое, Поверхностное	Умеренное	3,3±0,4
		50	67* (4/6)	Нет	Редкое, Глубокое	Значительное	4,5±0,3*
		80	0* (0/10)	Нет	Отсутствует	—	—
Опыт	70	50	100* (6/6)	Вялое	Редкое, Глубокое	Слабо выражено	1,8±0,3*
		80	100* (10/10)	Вялое	Редкое, Глубокое	Слабо выражено	2,9±0,3
		110	100 (10/10)	Нет	Редкое, Глубокое	Значительное	6,1±0,5
		140	33 (2/6)	Нет	Редкое, Глубокое	Значительное	8

Примечания: ⁺ — расшифровка значений: слабо выражено — естественная поза, успешное восстановление позы при ротации, шаткость походки, отсутствие других особенностей; умеренное — естественная поза, попытки восстановления позы при ротации, шаткость походки и наличие одной, нескольких или всех особенностей: движение по окружности, запрокидывание на бок; значительное — неестественное положение на спине, боку или животе, отсутствие реакции при ротации, беспорядочные движения конечностями, сгибание-разгибание туловища, отсутствие продуктивного движения. * — достоверное отличие параметров между группами ($p<0,01$).

Note: ⁺ — decoding of meanings: weakly expressed — natural posture, successful recovery of posture during rotation, unsteadiness of gait, absence of other features; moderate — natural posture, attempts to restore posture during rotation, shakiness of gait and the presence of one, several or all features: movement in a circle, tilting to the side; significant — unnatural position on the back, side or abdomen, lack of reaction during rotation, erratic movements of the limbs, flexion-extension of the trunk, lack of productive movement.

Выживаемость. Установлено, что перегрузки величиной 30 G продолжительностью 80 с приводят к гибели 17% интактных животных, величиной 40 G продолжительностью 80 с — 50%, величиной 70 G продолжительностью 50 с — 33%, величиной 70 G продолжительностью 80 с — 100%. Перегрузка 70 G продолжительностью 140 с приводит к гибели 67% животных в состоянии гипобии.

Продолжительностью перегрузки 70 G не приводящей к гибели является 110 с для животных опытной группы по сравнению с продолжительностью 20 с для животных контрольной группы, что больше в 5,5 раз ($p < 0,01$).

Визуальный осмотр. По извлечению из испытательной капсулы после воздействия перегрузки величиной 70 G продолжительностью 50 с наблюдались отличия у животных опытной и контрольной групп. При данном режиме все животные опытной группы в отличие от всех животных контрольной группы были в сознании. Нарушения координации у животных опытной группы были слабо выражены, время восстановления координации $1,8 \pm 0,3$ с, у животных контрольной группы они оценивались как значительные, время восстановления составило — $4,5 \pm 0,3$ с. Время восстановления координации для режима 70 G 50 с у животных опытной группы в 2,5 раза ($p < 0,01$) меньше по сравнению с животными контрольной группы.

При визуальном осмотре на следующие сутки после эксперимента у 3 (60%) животных группы Контроль 40 G 80 с сохранялся тремор. У остальных животных всех групп каких-либо нарушений координации или других особенностей не обнаружено.

Некропия. Ни у одного животного по завершению эксперимента визуально не наблюдалось внешних повреждений. При макроскопическом исследовании погибших животных значимых морфологических изменений в органах, а также переломов костей не наблюдалось, независимо от величины и продолжительности перегрузки. По результатам гистологического исследования признаков нарушения целостности тканей не выявлено. Отмечалось полнокровие тканей центральных органов при гибели животных как при 40 G, так и при 70 G для всех групп. Типичные виды гистологических исследований представлены на рисунке 2.

В настоящей экспериментальной работе установлено, что время безопасной продолжительности для интактных сирийских хомяков при перегрузке величиной 70 G составляет 20 с. А для животных в состоянии искусственного гипобии безопасная продолжительность воздействия перегрузки 70 G составляет 110 с, что в 5,5 раза больше по сравнению с контролем.

У лабораторных животных контрольной группы, переносивших перегрузки 40 G длительностью 80 с и 70 G длительностью 50 с, наблюдалось отсутствие сознания, что свидетельствует о нарушениях функции ЦНС. Все животные опытной группы, переносившие перегрузки 70 G длительностью 50 и 80 с, были в сознании при извлечении из испытательной капсулы, отмечена адекватная реакция в виде активных попыток принятия естественной позы при ротации животного, что свидетельствует о сохранении функционирования ЦНС. Также отмечено более быстрое восстановление координации у всех животных опытной группы по сравнению с контролем после испытаний в аналогичных условиях, что также свидетельствует о меньшем нарушении функции ЦНС.

Имеется прямая связь между летальностью и временем экспозиции как среди контрольных, так и среди опы-

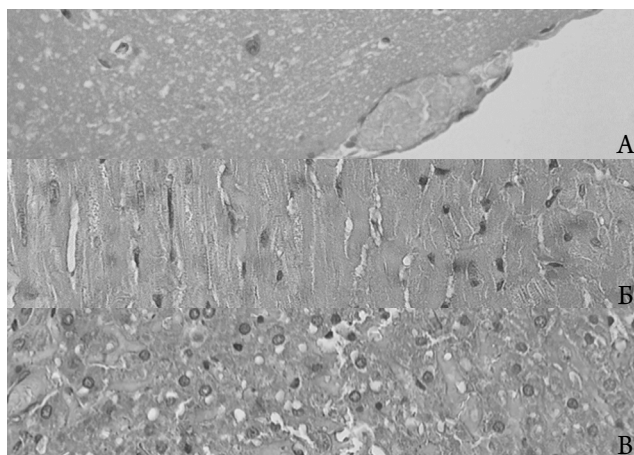


Рис. 2. Типичные виды результатов гистологического исследования

Примечания: А — Головной мозг. Капилляры мягкой мозговой оболочки полнокровны; периваскулярный, и в меньшей степени — перичеселлярный отёк. Б — Миокард. Полнокровие капилляров; хорошо выраженная поперечная исчерченность кардиомиоцитов. В — Печень. Выраженное полнокровие центральных вен, синусоидов и сосудов печеночных триад; распространённая вакуолизация цитоплазмы гепатоцитов.

Fig. 2. Typical types of histological examination results

Note: A — the brain. The capillaries of the soft meninges are full-blooded; perivascular, and to a lesser extent, pericellular edema. B — Myocardium. Fullness of capillaries; well-marked transverse striation of cardiomyocytes. B — Liver. Pronounced fullness of the central veins, sinusoids and vessels of hepatic triads; widespread vacuolization of the cytoplasm of hepatocytes.

ных групп. Ввиду увеличения летальности и отсутствия повреждений травматического характера при повышении времени экспозиции перегрузки, вероятнее всего, гибель животных обусловлена развитием циркуляторной гипоксии.

В предыдущих исследованиях экспериментально установлено, что при индукции искусственного гипобии с помощью фармакологической симпатической блокады происходит снижение потребления кислорода и выделения углекислого газа на 30% [6]. Наиболее вероятно, что достижение устойчивого положительного результата в данном исследовании у животных в состоянии искусственного гипобии заключается в увеличении доступности кислорода для тканей ЦНС, в частности — головного мозга, на фоне общего уменьшения потребления кислорода.

В рамках проведённого исследования разработан и создан экспериментальный стенд — центрифуга. На сирийских хомяках удалось создать адекватную модель негативного воздействия динамических перегрузок без нарушения целостности органов и скелета, что подтверждается результатами экспериментальной работы. Определены безопасные и летальные значения величины динамических перегрузок и их продолжительность как для интактных сирийских хомяков, так и для животных в состоянии искусственного гипобии.

Выводы:

1. Доказано увеличение в 5,5 раза времени безопасного пребывания животных в состоянии искусственного гипобии при динамических перегрузках.

2. Отмечено снижение времени восстановления координации у животных в состоянии искусственного гипобии в 2,5 раза.

Список литературы

1. Ercan E. Effects of aerospace environments on the cardiovascular system. *Anatol J Cardiol.* 2021; 25(1): 3–6.
2. Fundamentals of Aerospace Medicine (4 Ed.) April 16, 2008; by Jeffrey R. Davis MD MS, Robert Johnson MD MPH MBA, Jan Stepanek MD MPH, Jennifer A. Fogarty PhD.
3. Барер А.С. *Предел переносимости: Очерки об устойчивости человека к неблагоприятным факторам авиационного и космического полётов.* М.: Блок-информ экспресс; 2012.
4. Ушаков И.Б. *Космос. Радиация. Человек (Радиационный барьер в межпланетных полетах).* Под ред. И.Б. Ушакова. Москва: Издательство «Научная книга»; 2021.
5. Тимофеев Н.Н. *Гипобиоз и криобиоз: прошлое, настоящее и будущее.* Москва: Информ-Знание. 2005.
6. Макаров А.Ф., Ткачук Ю.В., Тоньшин А.А., Бухтияров И.В. Искусственный гипобиоз как способ защиты организма в условиях острой гипобарической гипоксии. *Мед. труда и пром. экол.* 2023; 63(1): 4–17.

References

1. Ercan E. Effects of aerospace environments on the cardiovascular system. *Anatol J Cardiol.* 2021; 25(1): 3–6.
2. Fundamentals of Aerospace Medicine (4 Ed.) April 16, 2008; by Jeffrey R. Davis MD MS, Robert Johnson MD MPH MBA, Jan Stepanek MD MPH, Jennifer A. Fogarty PhD.
3. Barer A.S. *Limit of Tolerance: Essays on Human Resilience to Unfavorable Factors of Aviation and Space Flights.* M.: Blok-inform ekspress, 2012.
4. Ushakov I.B. *Space. Radiation. Man (Radiation barrier in interplanetary flights).* Ed. I.B. Ushakov. Moskva: Izdatel'stvo «Nauchnaya kniga»; 2021.
5. Timofeev N.N. *Hypobiosis and Cryobiosis: past, present and future.* Moscow: Inform-Znaniye; 2005.
6. Makarov A.F., Tkachuk Yu.V., Ton'shin A.A., Bukhtiyarov I.V. Artificial hypobiosis as a method of acute altitude illness negative impact reduction. *Med. truda i prom. ekol.* 2023; 63(1): 4–17.