

УДК 612.017.1.06:612.766.1]-092.9:599.323.4
<https://doi.org/10.20538/1682-0363-2018-3-22-34>

Для цитирования: Гостюхина А.А., Замощина Т.А., Зайцев К.В., Гутор С.С., Жукова О.Б., Светлик М.В., Абдулкина Н.Г., Зайцев А.А. Адаптивные реакции крыс после световых десинхронозов и физического переутомления. *Бюллетень сибирской медицины*. 2018; 17 (3): 22–34.

Адаптивные реакции крыс после световых десинхронозов и физического переутомления

Гостюхина А.А.¹, Замощина Т.А.^{1, 2, 3}, Зайцев К.В.¹, Гутор С.С.^{1, 2},
Жукова О.Б.¹, Светлик М.В.^{2, 3}, Абдулкина Н.Г.¹, Зайцев А.А.¹

¹ Сибирский федеральный научно-клинический центр Федерального медико-биологического агентства (СибФНКЦ ФМБА) России

Россия, 636035, Томская обл., г. Северск, ул. Мира, 4

² Сибирский государственный медицинский университет (СибГМУ)

Россия, 634050, г. Томск, Московский тракт, 2

³ Национальный исследовательский Томский государственный университет (НИ ТГУ)

Россия, 634050, г. Томск, ул. Ленина, 36

РЕЗЮМЕ

Введение. Известно, что десинхроноз и физическая нагрузка до состояния утомления являются мощными стрессорирующими факторами для организма. Исследования свидетельствуют об истощающем воздействии сочетанных стрессорирующих факторов на адаптивные резервы организма, особенно при длительной совместной их экспозиции. Однако также хорошо известно адаптивное значение тренировочного процесса в разных видах деятельности. В этом плане представляется значимым изучение этих двух аспектов адаптации при сочетанном воздействии на организм светового десинхроноза и физического переутомления.

Целью настоящего исследования являлось изучение особенностей адаптивных реакций крыс в условиях световых десинхронозов и физического переутомления.

Материалы и методы. Экспериментальное исследование выполнено на 60 половозрелых самцах крыс породы Wistar. Для индукции экспериментального десинхроноза животные опытных групп в течение 10 сут содержались на искусственном ярком освещении (150 LX) либо полном затемнении (2-3 LX). Моделью физического переутомления выбрана методика принудительного плавания крыс до полного утомления, которая была нами модифицирована [15]. По завершении плавательного теста через 1 сут все животные выводились из эксперимента одномоментным декапитированием под CO₂ наркозом. У декапитированных животных собиралась кровь для получения сыворотки. В сыворотке определяли уровень лактата, а также концентрации кортикостерона и серотонина с помощью метода ИФА и набора реагентов IBL (Германия). Гистологический анализ стресс-реализующих органов проводили с помощью световой микроскопии на микроскопе Axioskop 40 фирмы CarlZeiss (Германия).

Результаты. Установлено, что физическое переутомление у крыс после ежедневной плавательной нагрузки (5 сут) с грузом сопровождалось понижением уровня кортикостерона в сыворотке крови и структурными изменениями в надпочечниках и бедренной мышце по сравнению с интактными животными. По сравнению с интактной группой темновая депривация и физическая нагрузка не изменяли содержание

✉ Гостюхина Алена Анатольевна, e-mail: exper@med.tomsk.ru.

кортикостерона, серотонина, лактата в сыворотке и вызывали незначительные деструктивные процессы в надпочечниках. Световая депривация и переутомление понижали уровень кортикостерона в крови, вызывали структурные изменения в надпочечниках и мышцах, повышали содержание серотонина в сыворотке, но не изменяли уровень лактата.

Выводы. Особенности адаптивных реакций крыс в условиях световых десинхронозов и физического переутомления определяются характером депривации или направлением фазового сдвига (лишение света или темноты). Темновая депривация с последующим физическим переутомлением вызывает развитие фазы резистентности общего адаптационного синдрома, а световая депривация с последующим физическим переутомлением – фазы истощения.

Ключевые слова: крысы, световая и темновая депривация, физическое переутомление, адаптивные реакции.

ВВЕДЕНИЕ

Некоторые виды профессиональной деятельности современного человека связаны с постоянной и быстрой сменой часовых поясов [1]. По данным Международной ассоциации воздушного транспорта, в настоящее время каждый пятый житель планеты хотя бы раз в год совершает трансмеридианные авиаперелеты [2]. В таких случаях в циркадианной системе человека неизменно развивается десинхронизация суточных биоритмов физиологических функций, или десинхроноз [1, 3].

Десинхронозы являются мощными стрессирующими факторами для всех систем организма [4]. При частом возникновении и длительном течении они могут расшатывать циркадианную организацию человека и приводить к развитию патологических процессов в той или иной физиологической системе [3, 4].

Физическая нагрузка до состояния полного утомления является не меньшим стрессирующим фактором, чем десинхронозы [1, 3, 5, 6]. Влияние сочетанного и длительного воздействия этих двух стрессоров на организм и адаптивные возможности человека изучены достаточно слабо. Сложность состоит в том, что как десинхроноз, так и утомление являются системными многофакторными, многосторонними и многоуровневыми процессами. Выраженность десинхроноза и скорость ресинхронизации циркадианной системы зависят от направления быстрого перемещения, количества преодолеваемых часовых поясов, возраста и пола человека, его хронотипа, продолжительности нахождения в новом часовом поясе и т.д. [1]. Не меньшее количество факторов определяют характер и выраженность физического утомления и особенности восстановительных процессов после него на разных уровнях организма.

Большинство исследований свидетельствуют об истощающем воздействии сочетанных стрес-

сирующих факторов на адаптивные резервы организма, особенно при длительной совместной их экспозиции [7]. Нередко такое истощение сопровождается хронической усталостью и быстрой утомляемостью [1, 3, 5]. Однако так же хорошо известно адаптивное значение тренировочного процесса в разных видах деятельности [6, 8]. Существует понятие перекрестной адаптации, выдвинутое Ф.З. Меерсоном [5]. В этом плане представляется весьма актуальным экспериментальное изучение этих двух аспектов адаптации при последовательном воздействии на организм светового десинхроноза и физического переутомления. Значимость таких исследований продиктована еще и необходимостью создания щадящих реабилитационных программ не только в спортивной медицине, медицине катастроф и экстремальных состояний, но и в обычной профессиональной деятельности человека в сложных экологических условиях.

Все в совокупности определило цель настоящей работы – изучение особенностей адаптивных реакций крыс в условиях световых десинхронозов и физического переутомления. Адаптивные реакции оценивали по содержанию в крови кортикостерона, серотонина и лактата, поскольку известно, что уровень лактата в крови отражает интенсивность анаэробных процессов (в основном гликолиза) в наиболее «работающих» органах [9], кортикостерон является надежным маркером фазы стресса [10, 11], а серотонин отражает состояние стресслимитирующих систем организма [5].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальное исследование выполнено в весеннее время года, в период равноденствия и в сроки, близкие к нему (конец марта – начало апреля 2012 г.). Использовано 60 половозрелых

самцов крыс породы Wistar массой 210–240 г. До эксперимента животных содержали в стандартных условиях вивария по 5–6 особей в клетках при естественном световом режиме и на стандартном рационе со свободным доступом к воде и пище. Круглосуточно в помещении вивария поддерживалась 50–65%-я влажность и температура воздуха 20–25 °С. Все процедуры с животными выполнялись в соответствии с международными правилами и нормами обращения с лабораторными животными, не противоречащими Женевской конвенции 1985 г. о «Международных принципах биомедицинских исследований с использованием животных» [12]. Животные были разделены на четыре группы: интактная группа (10 особей), крысы, находившиеся в естественных условиях освещения и подвергавшиеся физической нагрузке, – контрольная группа (10 особей); крысы, подвергавшиеся физической нагрузке после формирования у них экспериментального десинхроноза в условиях круглосуточного освещения, – опытная группа 1 (20 особей); крысы, подвергавшиеся физической нагрузке после формирования у них экспериментального десинхроноза в условиях круглосуточной темноты, – опытная группа 2 (20 особей). Для индукции экспериментального десинхроноза крысы опытных групп в течение 10 сут круглосуточно находились при искусственном ярком освещении 150 лк либо полном затемнении 2–3 лк [13].

Моделью физического переутомления была выбрана методика принудительного плавания крыс до полного утомления [14], которая была нами модифицирована (температура воды 26–28 °С; дополнительный груз 10% от веса тела) [15]. Критерием утомления служили три безуспешные попытки всплыть на поверхность либо отказ от таких попыток с опусканием на дно. Плавательный тест проводился на всех группах животных параллельно в одно и то же время суток (с 10.00 до 11.00 ч) в течение 5 сут подряд сразу после помещения животных из депривированных условий освещения на естественный режим свет – темнота. По завершении эксперимента, то есть через 24 ч, после теста «открытое поле» всех крыс выводили одномоментным декапитированием под CO₂ наркозом [12]. У декапитированных животных собирали кровь для получения сыворотки, в которой определяли уровень кортикостерона, лактата и серотонина [16, 17], после чего проводилась аутопсия надпочечников и бедренной мышцы. Определение уровня гормонов кортикостерона и серотонина в сыворотке периферической крови выполняли

с помощью твердофазного иммуноферментного «сэндвичевого» метода (ELISA), а концентрацию лактата проводили колориметрическим методом с использованием набора реагентов «Ольвекс диагностикум» (г. Санкт-Петербург) и с помощью биохимического анализатора Biochem SA (High technology, США), при длине волны 500 нм [16, 17].

Для приготовления гистологических препаратов аутопсии, полученные посмертно, фиксировали в 10%-м растворе нейтрального формалина в течение 24 ч, промывали в проточной воде и обезжировали в растворе на основе абсолютизированного изопропилового спирта IsoPrep (БиоВитрум, г. Санкт-Петербург). Затем образцы тканей заливали в гомогенизированную парафиновую среду HISTOMIX® (БиоВитрум, г. Санкт-Петербург). Парафиновые срезы толщиной 5–7 мкм, полученные при помощи санного микротома MC-2, окрашивали гематоксилином и эозином и по Ван-Гизону (красители для окрашивания фирмы BioOptica, Италия). Окрашенные препараты заключали в синтетическую монтирующую среду BioMount (BioOptica, Италия). Гистологические препараты изучали с помощью обычной световой микроскопии на микроскопе Axioskop 40 фирмы Carl Zeiss (Германия). Микрофотографии гистологических препаратов получали с помощью фотокамеры Canon G10 (Япония).

Статистическую обработку полученных результатов проводили на основе пакета программ Stat Soft Statistica v8.0. При обработке результатов проверяли группы на нормальность распределения исследуемого признака. Было установлено, что исследуемые признаки не подчинялись закону нормального распределения, поэтому для дальнейшего расчета использовали непараметрические критерии: медиану Me и квартили Q_1 (25%); Q_3 (75%). Проверку нормальности распределения проводили методом Шапиро – Уилка. Достоверность различий между группами определяли с помощью непараметрического критерия Манна – Уитни, используемого для двух независимых выборок и критерия Вилкоксона для проверки различий между зависимыми выборками. В работе обсуждались только статистически значимые результаты при $p < 0,05$ [21].

РЕЗУЛЬТАТЫ

В представленном эксперименте показано, что у крыс контрольной группы после предъявления пятидневного цикла плавательных нагрузок до

полного утомления уровень лактата увеличивался в 2,5 раза. В опытных группах этот показатель не изменялся по сравнению с аналогичным показателем у интактных животных (таблица), но

уменьшался в два раза в сравнении с контрольной. Из полученного материала следует, что крысы опытных групп не испытывали дефицита макроэргов.

Т а б л и ц а
Т a b l e

Уровень кортикостерона, серотонина и лактата в сыворотке крови крыс после световых десинхронозов и физического переутомления, $Me (Q_1; Q_3)$
The level of corticosterone, serotonin and lactate in the blood serum of rats after light desynchronization and physical overwork, $Me (Q_1; Q_3)$

Показатель Characteristic	Интактные (без воздействий, $n = 10$) Intact (with no impact, $n = 10$)	Контрольная группа (физическая нагрузка, $n = 10$) Control group (physical activity, $n = 10$)	Опытная группа 1 (темновая депривация + физическая нагрузка, $n = 20$) Experimental group 1 (dark deprivation + physical activity, $n = 20$)	Опытная группа 2 (световая депривация + физическая нагрузка, $n = 20$) Experimental group 2 (light deprivation + physical activity, $n = 20$)
Кортикостерон, нг/мл Corticosterone, ng/ml	192,5 (188,6; 196,8)	76,4 (15,6; 153,2) $p = 0,02$	195,9 (189,5; 197,6) $p_1 = 0,001$	130,45 (29,45; 231,5) $p = 0,01$ $p_1 = 0,04$
Серотонин, нг/мл Serotonin, ng/ml	32,9 (30,5; 35,4)	50,2 (49,3; 51,1) $p = 0,02$	38,5 (36,9; 40,1) $p_1 = 0,004$	39,9 (38,4; 41,5) $p = 0,02$ $p_1 = 0,004$
Лактат, ммоль/л Lactate, mmol/l	2,3 (2,2; 2,3)	5,2 (4,6; 5,7) $p = 0,02$	2,1 (1,8; 2,3) $p_1 = 0,003$	2,3 (2,2; 2,3) $p_1 = 0,01$

П р и м е ч а н и е. Уровень статистической значимости по отношению к интактной группе – p , по отношению к контрольной группе – p_1 .

N o t e. The level of statistical significance with respect to the intact group – p , with respect to the control group – p_1 .

При определении уровня кортикостерона в сыворотке отмечено, что содержание этого гормона после пятидневного плавательного цикла снижалось у крыс контрольной группы в 2,5 раза, а в группе животных со световой депривацией – только в 1,5 раза по сравнению с аналогичным показателем у интактных крыс. В группе животных с темновой депривацией уровень гормона не изменялся в сравнении с аналогичным показателем у интактных животных (см. табл.). Следовательно, крысы и контрольной, и опытной группы 2, скорее всего, находились в фазе истощения общего адаптационного синдрома, а опытной 1 – в фазе резистентности [22].

Как известно, для прогнозирования результатов стрессорного воздействия на организм необходимо знать состояние не только стресс-реализующих систем организма, но и других систем, участвующих в развитии стресса, таких, например, как серотонинергическая [5, 23]. Результаты данных исследований показали, что после пятидневного плавательного цикла уровень серотони-

на в плазме повышался в контрольной группе крыс в 1,5 раза, а в группе со световой депривацией – в 1,2 раза в сравнении с аналогичным показателем интактных животных (см. табл.). В группе животных с темновой депривацией содержание серотонина так же, как и кортикостерона, не изменялось. В целом полученные результаты свидетельствуют о реципрокном характере изменений содержания кортикостерона и серотонина в сыворотке крови крыс после последовательных стрессорных нагрузок в виде световых десинхронозов и физической нагрузки до состояния утомления.

Гистологический анализ надпочечников и бедренной мышцы исследованных животных позволил выявить наличие деструктивных процессов в этих органах, особенно выраженных в контрольной группе и группе после световой депривации, что в совокупности указывает на угнетение функционального состояния органов (рис. 1–4). При гистологическом исследовании надпочечников крыс контрольной группы, которая подвергалась только физической нагрузке при естественном

освещении, выявлены признаки вакуольной дистрофии эндокриноцитов коркового и мозгового вещества надпочечников (см. рис. 1). В надпочечниках крыс опытных групп признаки вакуольной дистрофии выявлялись только в отдельных эндокриноцитах (см. рис. 2). Гистологический анализ бедренной мышцы крыс контрольной группы выявил интерстициальный отек (см. рис. 3). Однако

в мышечных волокнах крыс опытных групп при моделировании физического переутомления в виде принудительного плавания с нагрузкой до полного утомления в течение 5 сут в условиях световых десинхронозов обнаружены волнообразная деформация мышечных волокон и лизис элементов сократительного аппарата мышечных клеток (см. рис. 4).

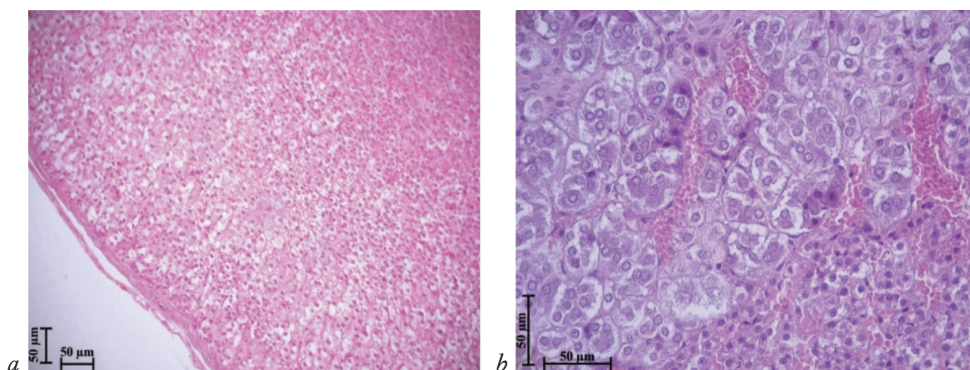


Рис. 1. Вакуольная дистрофия эндокриноцитов коркового (*a*) и мозгового (*b*) веществ надпочечника крыс после пятидневного цикла плавательного теста (контрольная группа). Окраска: гематоксилин и эозин. $\times 200$ (*a*), $\times 400$ (*b*)
 Fig. 1. Vacuolar dystrophy of the endocrinocytes of the cortical (*a*) and cerebral (*b*) adrenal gland substances of rats after a five-day swim test cycle (control group). Color: hematoxylin and eosin. $\times 200$ (*a*), $\times 400$ (*b*)

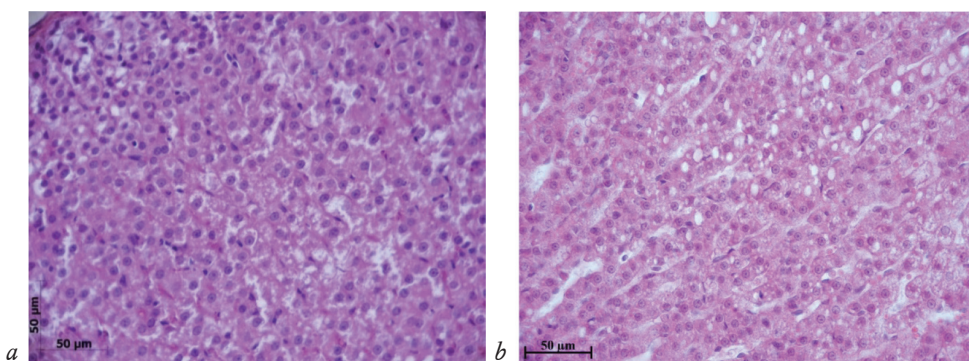


Рис. 2. Полнокровие капилляров пучковой зоны коры надпочечников крыс, эндокриноциты с признаками гидрорической дистрофии (стрелки): *a* – опытная группа 1 (темновая депривация и физическая нагрузка); *b* – опытная группа 2 (световая депривация и физическая нагрузка). Окраска: гематоксилин и эозин. $\times 400$
 Fig. 2. Congestion of the capillaries in the fascicular zone of the adrenal cortex of the rats, endocrinocytes with the signs of hydroptic dystrophy (arrows): *a* - experimental group 1 (dark deprivation and physical activity); *b* - experimental group 2 (light deprivation and physical activity). Color: hematoxylin and eosin. $\times 400$

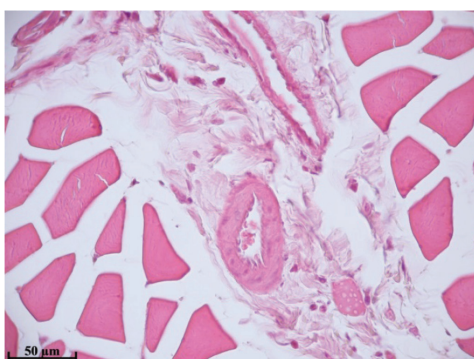


Рис. 3. Бедренная мышца крысы контрольной группы: интерстициальный отек. Окраска: гематоксилин и эозин. $\times 400$
 Fig. 3. Femoral muscle of a rat from the control group: interstitial edema. Color: hematoxylin and eosin. $\times 400$

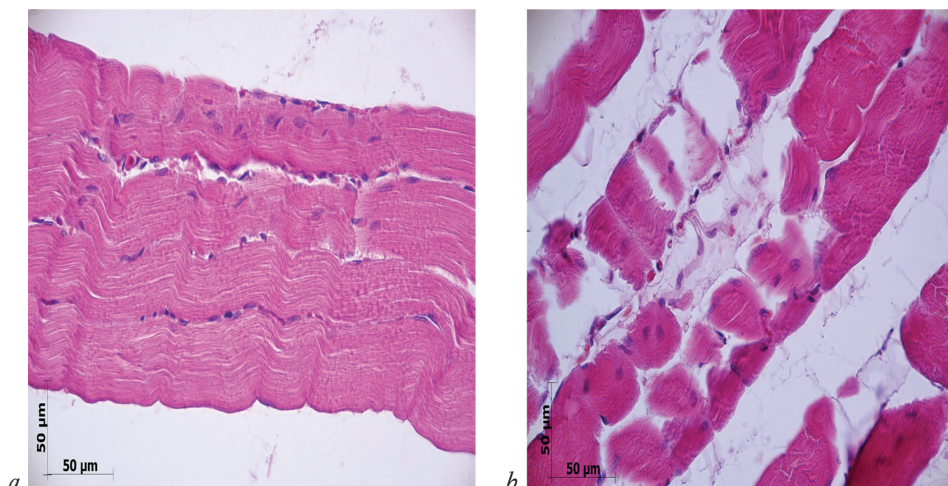


Рис. 4. Бедренная мышца крыс после световой депривации и физического переутомления (опытная группа 2): *a* – волнообразная деформация мышечных волокон; *b* – лизис элементов сократительного аппарата мышечных клеток. Окраска: гематоксилин и эозин. $\times 400$

Fig. 4. Femoral muscle of rats after light deprivation and physical overfatigue (experimental group 2): *a* – wave-like deformation of muscle fibers; *b* – lysis of the elements of the contractile apparatus of muscle cells. Color: hematoxylin and eosin. $\times 400$

ОБСУЖДЕНИЕ

В большинстве экспериментальных исследований при выборе сезона проведения эксперимента предпочтение отдается осенне-зимнему периоду. Считается, что в этот период крысы наименее чувствительны к стрессу. Действительно, изучение нами сезонной динамики содержания кортикостерона в сыворотке крови – основного гормона стресс-реализующей системы [5] – показало наименьший его уровень в осенне-зимний период, а наибольший – весной [19]. С учетом этого эксперимент проводился весной, в период равноденствия и в ближайшие к нему сроки, то есть в период повышенной чувствительности животных к стрессу.

Известно, что световая или темновая депривация на протяжении 10 сут и более [13, 24, 25] сопровождаются мощным внутренним десинхронизмом многих физиологических функций. Выраженность десинхронизма зависит от предыстории, то есть каков был световой режим до деприваций [13, 24, 25], а также от величины, направления и продолжительности фазового сдвига [3, 26, 27]. В данном случае и предыстория (СТ 12 : 12) и фазовый сдвиг (12 ч) и его продолжительность (10 сут) в обеих опытных группах были одинаковыми, а направление фазового сдвига противоположно (расширение и суживание световой фазы до максимума). Следовательно, выраженность десинхронизма будет определяться только направлением фазового сдвига. Это вторая причина выбора для эксперимента весеннего периода.

В нашем более раннем исследовании [18] показано, что после десятидневного содержания животных в условиях постоянного освещения или темноты первое предъявление плавательного теста сопровождалось повышением работоспособности крыс [18]. Время их активного плавания увеличивалось в сравнении с аналогичным показателем в этот срок контрольных животных, которые не подвергались световому десинхронизму, а находились при естественном освещении. Последующее тестирование опытной группы животных уже на 2-е сут в случае темновой депривации и 4-е сут в случае лишения света приводило к резкому понижению их работоспособности в сравнении с аналогичным показателем контрольной группы. Действительно, если у контрольных животных без десинхронизма от первого к пятому тестированию отмечено неуклонное увеличение времени активного плавания, т. е. повышение работоспособности вследствие тренировки [18], то в группе с десинхронизмом она, наоборот, неуклонно падала.

По нашему мнению, явление, наблюдаемое в 1–2-е сут предъявления плавательного теста в условиях световых десинхронизмов, совпадает с известным представлением Ф.З. Меерсона [5] о перекрестной адаптации, когда один стрессирующий фактор, в данном случае – десинхронизм, повышает устойчивость к другому стрессирующему фактору – плавательному тесту. О том, что плавательный тест является для крыс мощным стрессором, свидетельствуют не только данные других

авторов [14, 28], но и наши собственные исследования содержания кортикостерона в сыворотке крови крыс. Как известно, гормоны надпочечников относятся к стресс-реализующей системе, поэтому уровень сывороточного кортикостерона – наиболее объективный показатель стресс-реакции и отражает ее фазы.

В данном случае у контрольных животных без десинхроноза к 5-м сут ежедневного предъявления плавательного теста их работоспособность стабилизировалась на некотором уровне, но при этом содержание кортикостерона в сыворотке крови снижалось в 2,5 раза по сравнению с интактными животными, не получавшими никаких нагрузок. Следовательно, цена адаптации контрольных крыс к физической нагрузке была достаточно высокой, и сохранение жизни сопровождалось истощением симпатoadrenalовой системы, что имело и гистологическое подтверждение в виде вакуольной дистрофии эндокриноцитов коркового и мозгового вещества надпочечников (см. рис. 1). Кроме того, такое же истощение выявлено и в структуре скелетных мышц крыс после ежедневного плавания до полного утомления в течение 5 сут (см. рис. 3).

В бедренной мышце животных были отмечены признаки деструктивных процессов, которые, очевидно, были связаны с нарушением в миофибриллах метаболизма, возникновением гипоксии и «энергетического голода», подтвержденного повышением уровня лактата в сыворотке крови крыс в 2,5 раза. Следует подчеркнуть, что состояние истощения, возможно, было бы еще большим, если бы не подключалась стресс-лимитирующая система, каковой можно считать серотонинергическую [5, 23]. Действительно, уровень серотонина в сыворотке периферической крови крыс после ежедневной физической нагрузки в течение 5 сут увеличивался, хотя и незначительно (в 1,5 раза), но достоверно. Кстати, на миофибриллах скелетных мышц были обнаружены рецепторы серотонина второго типа, ответственные за активацию гликолитических процессов в них [29]. О том, что ежедневная физическая нагрузка до полного утомления в течение 5 сут ведет к определенному истощению и в центральной нервной системе, свидетельствует поведение крыс в тесте «открытое поле». Результаты этих исследований опубликованы нами ранее [30]. Данный тест продемонстрировал угнетение в 1,5–2 раза активно-поисковой составляющей поведения без изменения других компонентов, что вряд ли связано только с обычным утомлением, поскольку

ку «открытое поле» предъявлялось животным через 1 сут после последней пробы плавательного теста.

Таким образом, возвращаясь к динамике изменения работоспособности животных в условиях деприваций света или темноты, следует подчеркнуть, что десинхронозы оптимизировали работоспособность, но только в 1-е сут предъявления плавательного теста, а в последующие способствовали быстрому ее снижению. Как реагировали в этой ситуации стресс-чувствительные системы организма животных? Оказывается, эти реакции определялись как направлением фазового сдвига и характером деприваций, так и особенностью реагирующей системы. Если после лишения темноты и физического переутомления уровень кортикостерона в сыворотке крови не изменялся по сравнению с интактными и повышался в сравнении с контрольными, то после лишения света и пятидневного плавательного теста его содержание снижалось в сравнении с интактными и также повышалось в сравнении с контрольными.

Противоположная закономерность обнаружена у серотонина. Его уровень в опытной группе 1 (темновая депривация + физическая нагрузка) так же, как и кортикостерона, не изменялся в сравнении с интактными, но в отличие от кортикостерона снижался в сравнении с контрольными. В опытной группе 2 (световая депривация + физическая нагрузка) содержание моноамина в плазме повышалось в сравнении с интактными, но понижалось в сравнении с контрольными.

С учетом изложенных в литературе представлений о роли кортикостерона и серотонина в стресс-реализующей и стресс-лимитирующей системах [5, 19, 23] можно полагать, что лишение темноты в сочетании с физическим переутомлением сопровождалось резистентной фазой стресса, а лишение света с последующим плаванием приводило животных в состояние стресса в фазе истощения, но существенно менее выраженно, чем у контрольных крыс. Об этом же свидетельствует и гистологический анализ, который выявил признаки истощения в надпочечниках и деструктивные процессы в бедренной мышце у всех животных, кроме интактных, но наиболее выраженные в контрольной и группе со световой депривацией. Следует обратить внимание на то, что при этом ни в одной из опытных групп не обнаружено изменений уровня лактата в сыворотке крови в сравнении с крысами интактной группы, не получавшей никаких нагрузок и смены световых режимов. Это указывает на очевидное сохра-

нение нормальной энергетике мышц, несмотря на ежедневное предъявление плавательного теста животным.

Причина тому кроется, как нам кажется, в поведенческой стратегии крыс в плавательном тесте в условиях десинхроноза. В отличие от контрольных животных они плавали достаточно мало, экономя силы. Крысы повисали в воде, принимая распластанную позу на поверхности воды, и перебирали лапками ровно настолько, чтобы держаться на воде и не утонуть. В тесте «открытое поле» они также выбирали стратегию «экономии сил», то есть у них превалировали тормозные формы поведения (груминг). А в группе со световой депривацией присоединялась даже тревога (увеличилось количество дефекаций), указывающая на более выраженное состояние стресса, чем у крыс после темновой депривации и физического переутомления [30].

Таким образом, особенности адаптивных реакций животных в условиях световых десинхронозов и физического переутомления определяются направлением фазового сдвига. Расширение световой фазы до максимума в период весеннего равноденствия, соответствуя естественной генетически детерминированной программе роста освещенности, адаптирует животных к последующим стрессирующим физическим нагрузкам до полного утомления, способствует экономии метаболических ресурсов, ограничивает стресс-реакции и предупреждает истощение. Суживание светлой фазы суток до минимума, конфликтуя с естественной программой роста освещенности, заложенной в геноме крыс, сохраняет чувствительность к последующим стрессирующим физическим нагрузкам, однако последние утрачивают признаки истощения, отмеченные в контрольной группе.

Можно полагать, что в условиях десинхроноза понижение работоспособности, следуемое за первоначальным ее повышением, является своеобразной адаптивной стратегией поведения животных для сохранения энергетических ресурсов организма, причем при расширении светлой фазы суток эта стратегия развивается быстрее.

Возникает закономерный вопрос о механизме столь неоднозначного воздействия на организм крыс двух последовательных стрессорных нагрузок. Очевидная причина лежит в разнокачественности создаваемых экспериментально десинхронозов [20]. Кстати, в литературе давно описан более щадящий характер десинхронозов у человека при быстрой смене часовых поясов именно в

западном направлении, но не в восточном [1, 3]. Другая возможная причина состоит в двустороннем влиянии каждой стрессирующей нагрузки на результативность друг друга. Мы полагаем, что не только десинхроноз влияет на стресс-последствия физической нагрузки, но и последняя, повторяясь каждые 24 ч в течение 5 сут выступает в качестве внешнего цикла, захватывающего ритмы организма и оптимизирующего их. Известно, что структура биологических ритмов любого периода обязательно нарушается любым стресс-фактором [4, 13, 31, 32]. Вторично через обратные связи сформированная новая ритмика воздействует на стресс-реакции физической нагрузки. Во всяком случае, такая возможность нами продемонстрирована на примере годовой ритмики стресс-реализующей системы (кортикостерон) [19]. А годовая ритмика, по мнению биоритмологов, нередко является производной суточной гармоникой [33]. Нами показано, что в совокупности последовательное воздействие на организм крыс десинхроноза и физической нагрузки сопровождается в случае расширения светлой фазы суток (темновая депривация) наилучшей оптимизацией годовой гармоникой кортикостерона, именно того гормона, который определяет ответные реакции организма на стресс на всех уровнях организации [19]. Очевидно, десятидневные световые десинхронозы адаптируют организм животных к последующему стрессу в виде физического переутомления, но при этом физическая нагрузка в течение 5 дней ликвидирует созданный десинхроноз.

Таким образом, особенности адаптивных реакций крыс в условиях световых десинхронозов и физического переутомления определяются характером депривации или направлением фазового сдвига (лишение света или темноты). Темновая депривация с последующим физическим переутомлением вызывают развитие фазы резистентности общего адаптационного синдрома, а световая депривация с последующим физическим переутомлением – фазы истощения. Следует подчеркнуть, что выявленные особенности адаптивных реакций животных после световых десинхронозов и физического переутомления характерны для весеннего сезона, и не факт, что они будут развиваться аналогично в другие сезоны года.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

ВКЛАД АВТОРОВ

Гостюхина А.А. – проведение экспериментальной и аналитической части исследования, анализ и интерпретация данных, написание рукописи статьи. Замощина Т.А. – анализ и интерпретация данных, написание рукописи статьи. Зайцев К.В. – разработка концепции и дизайна. Жукова О.Б. – редактирование и оформление статьи.

Гутор С.С. – проведение практической части исследования (гистологический анализ), анализ и интерпретация данных. Светлик М.В. – статистическая обработка полученных результатов. Абдулкина Н.Г. – разработка концепции, окончательное утверждение для публикации рукописи. Зайцев А.А. – разработка концепции, окончательное утверждение для публикации рукописи.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Авторы заявляют об отсутствии финансирования при проведении исследования.

СООТВЕТСТВИЕ ПРИНЦИПАМ ЭТИКИ

Исследование одобрено локальным этическим комитетом ФГБУН ТНИИКиФ ФМБА России (протокол № 3 от 22.03.2012 г.).

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Ежов С.Н. Хронофизиология географических перемещений. Владивосток: Изд-во ДВГАЭУ, 2003: 212. [Ezhov S.N. Chronophysiology of geographical displacement. Vladivostok: DVGAEU Publ., 2003 (in Russ.).]
- Годовой отчет ИАТА. [Annual report of IATA. (in Russ.)]. fs.moex.com/content/annualreports/4039/1/ehyrastana-annual-report-2015-ru.pdf.
- Матюхин В.А., Путилов А.А., Ежов С.Н. Рекомендации по прогнозированию и профилактике десинхронозов (хронофизиологические аспекты географических перемещений). Новосибирск: Изд-во СО АМН СССР, 1984: 50. [Matyukhin V.A., Putilov A.A., Ezhov S.N. Recommendations for the prediction and prevention of desynchronoses (chronobiological aspects of geographical displacement). Novosibirsk: SO AMN SSSR Publ., 1984 (in Russ.).]
- Степанова С.И., Галичий В.А. Космическая биоритмология. Хронобиология и хрономедицина. М.: изд-во «Триада-Х», 2000: 239. [Stepanova S.I., Galichiy V.A. Space biorhythmology. Chronobiology and chronomedicine. Moscow: Triada-X Publ., 2000: 239 (in Russ.).]
- Меерсон Ф.З., Пшеничкова М.Г. Адаптация к стрессорным ситуациям и физическим нагрузкам. М.: изд-во «Медицина», 1988: 253. [Meerson F.Z., Pshennikova M.G. Adaptation to the stress situations and physical activity. Moscow: Meditsina Publ., 1988: 253 (in Russ.).]
- Исаев А.П., Личагина С.А., Гаттаров Р.У. Стратегии адаптации человека. Челябинск: изд-во ЮУрГУ, 2003: 187. [Isaev A.P., Lichagina S.A., Gattarov R.U. Strategies for human adaptation. Chelyabinsk: YuUrGU Publ., 2003: 187 (in Russ.).]
- Солопов И.Н., Камчатников А.Г., Сентябрев Н.Н., Горбанева Е.П. Оптимизация психофункционального состояния спортсменов при предельных физических нагрузках в жарком климате с помощью дополнительного мертвого пространства. *Фундаментальные исследования*. 2013; 8: 900–904. [Solopov I.N., Kamchatnikov A.G., Sentyabrev N.N., Gorbaneva E.P. Optimization of psycho-functional status of athletes during extreme physical exertion in hot climates with an additional dead space. *Fundamental'nye issledovaniya – Basic Research*. 2013; 8: 900–904 (in Russ.).]
- Платонов В.Н. Система подготовки спортсменов в олимпийском спорте. Общая теория и ее практические приложения. Киев: Олимпийская литература, 2004: 408. [Platonov V.N. Olympic literature. Kiev: Olimpiyskaya literatura Publ., 2004: 408 (in Russ.).]
- Brancaccio P., Lippi G., Mffulli N. Biochemical markers of muscular damage. *Clin. Chem. Lab. Med.* 2010; 48 (6): 757–767. DOI: 10.1515/CCLM.2010.179.
- Обут Т.А., Овсякова М.В., Черкасова О.П. Пролонгированный лимитирующий стресс-реактивность эффект дегидроэпиандростерон-сульфата. *Бюл. эксперим. биологии и медицины*. 2006; 141 (5): 507–510. [Cherkasova O.P. Long-acting stress-reactivity-limiting effect of dehydroepiandrosterone sulfate. *Byul. eksperim. biologii i meditsiny*. 2006; 141 (5): 507–510 (in Russ.).]
- Керея А. В. Физиологические эффекты воздействия наносекундных импульсных электромагнитных излучений на головной мозг и эпидидимальную жировую ткань мышей : дис. ... канд. биол. наук. Томск, 2016: 175. [Kereya A.V. Physiological effects of nanosecond pulse electromagnetic radiation on the brain and epididymal adipose tissue of mice: dis. ... kand. biol. nauk. Tomsk, 2016: 175 (in Russ.).]
- РФ ГОСТ Р-53434-2009 Принципы надлежащей лабораторной практики. М.: изд-во «Стандартинформ», 2010. [State Standard R-53434-2009. The principles of good laboratory practice. Moscow: Standartinform Publ., 2010: 16 (in Russ.).]
- Замощина Т.А. Лития оксибутират и ритмическая структура активно-поискового поведения и температуры тела крыс в условиях постоянного освещения. *Экспер. и клин. фармакол.* 2000; 63 (2): 12–15. [Zamoshchina T.A. Effect of lithium hydroxybutyrate on the circadian structure of the active-search behavior and body temperature in rats under constant illumination conditions. *Experimental'naya i klinicheskaya farmakologiya – Experimental and Clinical Pharmacology*. 2000; 63 (2): 12–15 (in Russ.).]
- Волчегорский И.А., Долгушин И.И., Колесников О.Л., Цейликман В.Э. Экспериментальное моделирование и лабораторная оценка адаптивных реакций организма. Челябинск: изд-во ЧГПУ, 2000: 167. [Volchegorskiy I.A., Dolgushin I.I., Kolesnikov O.L., Tseylikman V.E. Experimental modeling and laboratory evaluation of adaptive reactions. Chelyabinsk, 2000: 167 (in Russ.).]

15. Патент № 2617206, Российской Федерации МПК G09B 23/28 (2006/01), Способ моделирования физического переутомления у крыс в условиях десинхронозов / Гостюхина А.А. (RU), Зайцев К.В. (RU), Замощина Т.А. (RU), Светлик М.В. (RU), Жукова О.Б. (RU), Абдулкина Н.Г. (RU), Зайцев А.А. (RU), Воробьев В.А. (RU). № 2015133700; заяв. 11.08.2015; опубл. 21.04.2017 бюл. № 12: 7. [Patent № 2617206, Rossiyskoy Federatsii MPK G09V 23/28 (2006/01), A method for modeling physical fatigue in rats under conditions of desynchronization / Gostyukhina A.A. (RU), Zaytsev K.V. (RU), Zamoshchina T.A. (RU), Svetlik M.V. (RU), Zhukova O.B. (RU), Abdulkina N.G. (RU), Zaytsev A.A. (RU), Vorob'ev V.A. (RU). № 2015133700; zaav. 11.08.2015; opubl. 21.04.2017 byul. № 12: 7 (in Russ.)].
16. Долгова В.В., Меньшикова В.В. Клиническая лабораторная диагностика: национальное руководство. В 2 т. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2012: 928. [Dolgova V.V., Men'shikov V.V. Clinical laboratory diagnostics: national guidelines. In 2 vol. Moscow: GEOTAR-Media Publ., 2012: 928 (in Russ.)].
17. Круглов С.В. Основы метода иммуноферментного анализа. М.: Московский государственный медико-стоматологический университет, 2010: 58. [Kruglov S.V. Principles of the method of enzyme immunoassay. Moscow: Publ. of Moscow State University of Medicine and Dentistry, 2010: 58 (in Russ.)].
18. Гостюхина А.А., Замощина Т.А., Зайцев К.В., Жукова О.Б., Светлик М.В., Абдулкина Н.Г., Зайцев А.А. Влияние световой или темновой депривации на работоспособность и уровень лактата в крови крыс. *Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова*. 2016; 102 (5): 584–589. [Gostyukhina A.A., Zamoshchina T.A., Zaytsev K.V., Zhukova O.B., Svetlik M.V., Abdulkina N.G., Zaytsev A.A. The effect of light or dark deprivation on the performance and level of lactate in the blood of rats. *Ros. fiziol. zhurn. im. I.M. Sechenova – Ros. Fiziol. Zh. Them. I.M. Sechenov*. 2016; 102 (5): 584–589 (in Russ.)].
19. Гостюхина А.А., Зайцев К.В., Замощина Т.А., Жукова О.Б., Светлик М.В., Абдулкина Н.Г. Сезонные особенности содержания кортикостерона в сыворотке крови крыс после физического переутомления в условиях светового десинхроноза. *Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова*. 2016; 102 (1): 50–55. [Gostyukhina A.A., Zaytsev K.V., Zamoshchina T.A., Zhukova O.B., Svetlik M.V., Abdulkina N.G. Seasonal features of the content of corticosterone in the blood serum of rats after physical overwork in conditions of light desynchronization. *Ros. fiziol. zhurn. im. I.M. Sechenova – Ros. fiziol. zh. them. I.M. Sechenov*. 2016; 102 (1): 50–55 (in Russ.)].
20. Гостюхина А.А., Замощина Т.А., Зайцев К.В., Жукова О.Б., Светлик М.В., Абдулкина Н.Г., Зайцев А.А. Уровень серотонина в сыворотке крови крыс после физического переутомления в условиях светового десинхроноза в разные сезоны года. *Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова*. 2016; 102 (9): 1082–1088. [Gostyukhina A.A., Zamoshchina T.A., Zaytsev K.V., Zhukova O.B., Svetlik M.V., Abdulkina N.G., Zaytsev A.A. The level of serotonin in the blood serum of rats after physical overwork in conditions of light desynchronization in different seasons of the year. *Ros. fiziol. zhurn. im. I.M. Sechenova – Ros. fiziol. zh. them. I. M. Sechenov*. 2016; 102 (9): 1082–1088 (in Russ.)].
21. Медик В.А., Токмачев М.С., Фишман Б.Б. Статистика в медицине и биологии. В 2 т. М.: Изд-во Медицина, 2001. [Medik V.A., Tokmachev M.S., Fishman B.B. Statistics in medicine and biology. In 2 vol. Moscow: Medicine Publ., 2001 (in Russ.)].
22. Селье Г. Очерки об адаптационном синдроме. М.: изд-во «Медгиз», 1960: 254. [Sel'e G. Essays on the Adaptation Syndrome. Moscow, Publishing house Medgiz, 1960: 254 (in Russ.)].
23. Камскова Ю.Г., Локтионова И.В. Особенности поведенческого статуса и состояния ГАМК-ергической системы и церебральной моноаминоксидазной активности у крыс в динамике 30-ти суточной гипокинезии. *Пат. физиол. и эксперим. тер.* 2003; 3: 17–18. [Kamskova Yu.G., Loktionova I.V. Peculiarities of the behavioral status and state of the GABAergic system and cerebral monoamine oxidase activity in rats in the dynamics of 30-day hypokinesia. *Pat. fiziol. i eksper. ter.* 2003; 3: 17–18 (in Russ.)].
24. Котельникова С.В., Котельников А.В., Новакова О.И., Филиппова Е.А. Функциональное состояние супрахиазматического ядра гипоталамуса и щитовидной железы организмов разного пола в условиях измененных фоторежимов. *Известия Самарского научного центра РАН*. 2012; 14 (5–2): 460–462. [Kotel'nikova S.V., Kotel'nikov A.V., Novakova O.I., Filippova E.A. Functional state of the suprachiasmatic nucleus of the hypothalamus and thyroid gland of organisms of different sexes under the conditions of modified photoregulations. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2012; 14 (5–2): 460–462 (in Russ.)].
25. Котельникова С.В., Котельников А.В., Теплый Д.А. Влияние режима освещенности на интенсивность перекисного окисления липидов в норме и при кадмиевой интоксикации. *Естественные науки*. 2014; 3: 55–62. [Kotel'nikova S.V., Kotel'nikov A.V., Teply D.L. Influence of the illumination regime on the intensity of lipid peroxidation in norm and with cadmium intoxication. *Estestvennye nauki*. 2014; 3: 55–62 (in Russ.)].
26. Ашофф Ю. Биологические ритмы. М.: изд-во «Мир», 1984: 260. [Ashoff Yu. Biological rhythms. Moscow: Mir Publ., 1984: 260 (in Russ.)].
27. Питтендрих К. Циркадианные системы: общая перспектива. *Биологические ритмы*. М.: Изд-во «Мир», 1984: 22–53. [Pittendrih K. Circadian systems: general perspective. Biological rhythms. Moscow: Mir Publ., 1984: 22–53 (in Russ.)].

28. Бобков Ю.Г., Виноградов В.М., Катков В.Ф., Лосев С.С., Смирнов А.В. Фармакологическая коррекция утомления. М.: изд-во «Медицина», 1984: 208. [Bobkov Yu.G., Vinogradov V.M., Katkov V.F. Pharmacological correction of fatigue. Moscow: Medicine Publ., 1984: 208 (in Russ.)].
29. Versteeg R., Serlie M., Karlsbeek A., la Fleur S. Serotonin, a possible intermediate between disturbed circadian rhythms and metabolic disease. *J. Neurosci.* 2015; 30(1): 155–167. DOI: 10.1016/j.neuroscience.2015.05.067.
30. Гостюхина А.А., Замощина Т.А., Светлик М.В., Жукова О.Б., Зайцев К.В., Абдулкина Н.Г. Поведенческая активность крыс в «открытом поле» после световой или темновой депривации и физического переутомления. *Бюллетень сибирской медицины.* 2016; 15 (3): 16–23. [Gostyukhina A.A., Zamoshchina T.A., Svetlik M.V., Zhukova O.B., Zaytsev K.V., Abdulkina N.G. Behavioral activity of rats in the “Open field” after light or dark deprivation and physical overfatigue. *Byulleten' sibirskoy meditsiny – Bulletin Siberian Medicine.* 2016; 15 (3): 16–23 (in Russ.)].
31. Замощина Т.А., Иванова Е.В. Особенности суточной динамики содержания натрия, калия, кальция и лития в крови, мозге крыс в зависимости от сезона года и режима освещения. *Вестник Оренбургского государственного университета.* 2006; приложение_2 (62): 104–106. [Zamoshchina T.A., Ivanova E.V. Features of daily changes in sodium, potassium, calcium and lithium in the blood, brain of rats depending on the season and lighting regime. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta.* 2006; 12 prilozhenie 2 (62): 104–106 (in Russ.)].
32. Зарипов А.А., Потапов Р.В., Ашанина Е.Н. Современные представления об использовании принципа биологической обратной связи в коррекции функционального состояния организма сотрудников силовых ведомств при сменном режиме деятельности. *Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях.* 2015;2: 86–99. [Zaripov A.A., Potapov R.V., Ashanina E.N. Modern ideas about the use of the principle of biological feedback in the correction of the functional state of the body of law enforcement officials working shifts. *Mediko-biologicheskie i sotsial'no-psikhologicheskie problemy bezopasnosti v chrezvychaynykh situatsiyakh – Medico-biological and socio-psychological problems of safety in emergency situations.* 2015; 2: 86–99 (in Russ.)].
33. Гвиннер Э. Цирканнуальные системы. Биологические ритмы: пер. с англ. М.: изд-во «Мир», 1984. Т. 2: 55–80. [Gvinner E. Circumannual rhythms. Biological rhythms: per. s angl. Moscow: Mir Publ., 1984. Vol. 2: 55–80 (in Russ.)].

Поступила в редакцию 17.07.2017

Подписана в печать 15.05.2018

Гостюхина Алена Анатольевна, канд. биол. наук, науч. сотрудник, экспериментальная лаборатория биомедицинских технологий, СибФНКЦ ФМБА России, г. Северск.

Замощина Татьяна Алексеевна, д-р биол. наук, ст. науч. сотрудник, экспериментальная лаборатория биомедицинских технологий, СибФНКЦ ФМБА России, г. Северск; профессор, кафедра фармацевтической технологии и биотехнологии, СибГМУ; профессор, кафедра физиологии человека и животных, НИ ТГУ, г. Томск.

Зайцев Константин Васильевич, канд. мед. наук, руководитель экспериментальной лаборатории биомедицинских технологий, СибФНКЦ ФМБА России, г. Северск.

Гутор Сергей Сергеевич, канд. мед. наук, науч. сотрудник, экспериментальная лаборатория биомедицинских технологий, СибФНКЦ ФМБА России, г. Северск; доцент, кафедра морфологии, СибГМУ, г. Томск.

Жукова Оксана Борисовна, д-р мед. наук, вед. науч. сотрудник, экспериментальная лаборатория биомедицинских технологий, СибФНКЦ ФМБА России, г. Северск.

Светлик Михаил Васильевич, канд. биол. наук, доцент, кафедра медицинской и биологической кибернетики, СибГМУ; доцент, кафедра физиологии человека и животных, НИ ТГУ, г. Томск.

Абдулкина Наталья Геннадьевна, д-р мед. наук, зам. генерального директора по научно-клинической работе Филиала «Томский научно-исследовательский институт курортологии и физиотерапии», СибФНКЦ ФМБА России, г. Северск.

Зайцев Алексей Александрович, канд. мед. наук, директор Филиала «Томский научно-исследовательский институт курортологии и физиотерапии», СибФНКЦ ФМБА России, г. Северск.

✉ **Гостюхина Алена Анатольевна**, e-mail: exper@med.tomsk.ru.

УДК 612.017.1.06:612.766.1]-092.9:599.323.4

<https://doi.org/10.20538/1682-0363-2018-3-22-34>

For citation: Gostyukhina A.A., Zamoshchina T.A., Zaitsev K.V., Gutor S.S., Zhukova O.B., Svetlik M.V., Abdulkina N.G., Zaitsev A.A. Adaptive reactions of rats after light desynchronization and physical overwork. *Bulletin of Siberian Medicine*. 2018; 17 (3): 22–34.

Adaptive reactions of rats after light desynchronization and physical overwork

Gostyukhina A.A.¹, Zamoshchina T.A.^{1,2,3}, Zaitsev K.V.¹, Gutor S.S.^{1,2},
Zhukova O.B.¹, Svetlik M.V.^{2,3}, Abdulkina N.G.¹, Zaitsev A.A.¹

¹ *Siberian Federal Scientific Clinical Center (SFSCC) of the Federal Medical and Biological Agency (FMBA)*
4, Mira Str., Seversk, Tomsk Region, 636035, Russian Federation

² *Siberian State Medical University (SSMU)*
2, Moscow Tract, Tomsk, 634050, Russian Federation

³ *National Research Tomsk State University (NR TSU)*
36, Lenina Av., Tomsk, 634050, Russian Federation

ABSTRACT

It is known that desynchronization and physical stress to the point of fatigue are powerful stressors for the body. Studies indicate a depleting effect of the combined stress factors on the adaptive reserves of the organism, especially when the joint exposure is prolonged. However, the adaptive value of the training process in various activities is also well known. In this regard, it seems important to study these two aspects of adaptation when combined effects of light desynchronization and physical overwork on the body.

Purpose of this study was to study the features of adaptive reactions of rats under conditions of light desynchronization and physical overwork.

Materials and methods. An experimental study was performed on 60 mature male rats of the Wistar breed. For the induction of experimental desynchronization, the animals of the experimental groups were kept for 10 days in artificial bright illumination (150 LX) or full darkening (2-3 LX). The model of physical overfatigue used the method of forced swimming of rats to complete fatigue in their own modification. At the end of the swim test, all the animals were withdrawn from the experiment and underwent one-step-long decapitation under CO₂ with anesthesia. In decapitated animals, to collect serum, the blood was collected in a clean, dry vial. In the blood serum of rats, the biochemical standard method was used to determine the level of lactate. Using the ELISA method and the reagent kit "IBL" (Germany), the concentrations of corticosterone and serotonin were determined. The histological analysis of the stress-realizing organs was carried out according to a standard procedure using light microscopy using the Axioskop 40 microscope from CarlZeiss (Germany).

Results. It was found that physical fatigue in rats after daily swimming activities (5 days) was accompanied by a decrease in the level of corticosterone in the blood serum and destructive changes in the adrenal and femoral muscles in comparison with intact animals. In comparison with the intact group, dark deprivation and physical activity did not alter the content of corticosterone, serotonin, and lactate in the blood and caused minor destructive processes in the adrenal glands. Light deprivation and fatigue lowered the level of corticosterone in the blood, caused destructive changes in the adrenal glands and muscles, and increased serotonin levels in serum, but did not change the level of lactate.

Conclusions. The features of adaptive reactions of rats under conditions of light desynchronization and physical overfatigue are determined by the nature of deprivation or the direction of the phase shift (deprivation of light or darkness). Dark deprivation followed by physical overfatigue causes the development of the resistance phase of the general adaptation syndrome, and light deprivation followed by physical overwork is the phase of exhaustion.

Key words: rats, light and dark deprivation, physical overwork, adaptive reactions.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

SOURCE OF FINANCING

The authors state that there is no funding for the study.

CONFORMITY WITH THE PRINCIPLES OF ETHICS

The study approved by the local ethics committee under SFSCC (Protocol No. 3 of 22.03.2012).

Received 17.07.2017

Accepted 15.05.2018

Gostyukhina Alena A., Researcher, Experimental Laboratory Biomedical Technologies, SFSCC MBA, Seversk, Tomsk Region, Russian Federation.

Zamoshchina Tat'yana A., DBSc, Senior Researcher, Experimental Laboratory Biomedical Technologies, SFSCC FMBA, Seversk, Tomsk Region; Professor, Department of Pharmaceutical Technology and Biotechnology, SSMU; Professor, Department of Human and Animal Physiology, NR TSU, Tomsk, Russian Federation.

Zaitsev Konstantin V., PhD, Head of Experimental Laboratory Biomedical Technologies, SFSCC FMBA, Seversk, Tomsk Region, Russian Federation.

Gutor Sergey S., PhD, Researcher, Experimental Laboratory Biomedical Technologies, SFSCC FMBA, Seversk, Tomsk Region; Associate Professor, Department of Morphology, SSMU, Tomsk, Russian Federation.

Zhukova Oksana B., DM, Leading Researcher, Experimental Laboratory Biomedical Technologies, SFSCC FMBA, Seversk, Tomsk Region, Russian Federation.

Svetlik Mikhail V., PhD, Associate Professor, Department of Medical and Biological Cybernetics, SSMU; Department of Human and Animal Physiology, NR TSU, Tomsk, Russian Federation.

Abdulkina Natal'ya G., DM, Deputy General Director for Research and Clinical Work, Tomsk Scientific Research Institute of Balneology and Physiotherapy, SFSCC FMBA, Seversk, Tomsk Region, Russian Federation.

Zaytsev Alexey A., PhD, Director of the Tomsk Scientific Research Institute of Balneology and Physiotherapy, SFSCC FMBA, Seversk, Tomsk Region, Russian Federation.

(✉) **Gostyukhina Alena A.**, e-mail: exper@med.tomsk.ru.