

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco636704>

EDN: NNGVMW



Сезонная динамика работоспособности и процесс адаптации лабораторных крыс к физической нагрузке после моделирования световых десинхронозов

А.А. Гостюхина^{1,2}, Т.А. Замощина^{2,3}, М.В. Светлик^{2,3}, О.С. Дорошенко^{1,3},
О.Б. Жукова¹, К.В. Зайцев¹

¹ Федеральный научно-клинический центр медицинской реабилитации и курортологии Федерального медико-биологического агентства, Московская область, Солнечногорск, Россия;

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия;

³ Сибирский государственный медицинский университет, Томск, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. За прошедшие пять лет появились новые данные, полученные как в экспериментах на животных, так и в эпидемиологических наблюдениях, представившие дополнительные доказательства негативного воздействия светового десинхроноза на организм. Расшатывание структуры ритмической организации неизменно приводит к расшатыванию гомеостаза и ослаблению адаптивных возможностей организма, что может привести к развитию патологических процессов.

Цель исследования. Изучить сезонную динамику работоспособности и процесс адаптации лабораторных крыс к физической нагрузке после моделирования световых десинхронозов и оценить уровень лактата в сыворотке крови в данных условиях.

Материалы и методы. Исследование выполнено на 240 аутбредных, половозрелых крысах-самцах стока Wistar в периоды осень-зима и весна-лето. Экспериментальный десинхроноз моделировали при помощи нахождения животных в течение 10 суток при круглосуточном искусственном ярком освещении (150 лк) либо при полном затемнении (2–3 лк). Для изучения сезонной динамики работоспособности использовали методику принудительного плавания до полного утомления, однократно в одно и то же время суток в течение пяти дней подряд. В сыворотке крови животных определяли концентрацию лактата стандартным методом с использованием набора реагентов.

Результаты. Установлено, что работоспособность лабораторных крыс и содержание лактата в их крови взаимосвязаны. Чем выше работоспособность, тем ниже уровень лактата. При этом предъявление светового десинхроноза в сочетании с плавательным тестом внесло свои особенности в изменения уровня лактата.

Заключение. Ритмическая структура сезонной динамики работоспособности животных и содержание лактата в сыворотке крови после моделирования светового десинхроноза свидетельствуют о напряжении адаптивно-компенсаторных возможностей организма и о нарушении метаболических процессов.

Ключевые слова: сезон года; работоспособность; плавательный тест; световой десинхроноз; адаптация.

Как цитировать:

Гостюхина А.А., Замощина Т.А., Светлик М.В., Дорошенко О.С., Жукова О.Б., Зайцев К.В. Сезонная динамика работоспособности и процесс адаптации лабораторных крыс к физической нагрузке после моделирования световых десинхронозов // Экология человека. 2024. Т. 31, № 10. С. 738–749.

DOI: 10.17816/humeco636704 EDN: NNGVMW

Рукопись поступила: 04.10.2024

Рукопись одобрена: 03.03.2025

Опубликована online: 09.04.2025

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco636704>

EDN: NNGVMW

Seasonal Changes of Physical Performance and Adaptation Process in Laboratory Rats Following Light Desynchronization Modeling

Alena A. Gostuhina^{1,2}, Tatyana A. Zamoshina^{2,3}, Mikhail V. Svetlik^{2,3},
Olga S. Doroshenko^{1,3}, Oksana B. Zhukova¹, Konstantin V. Zaitsev¹

¹ Federal Scientific and Clinical Center of Medical Rehabilitation and Balneology of the Federal Medical and Biological Agency of Russia, Moscow region, Solnechnogorsk, Russia;

² Tomsk State University, Tomsk, Russia;

³ Siberian State Medical University, Tomsk, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Over the past five years, new data from both animal studies and epidemiological observations have provided additional evidence of the adverse effects of light desynchronization on the body. Disruption of rhythmic organization inevitably leads to destabilization of homeostasis and a decline in the body's adaptive capacity, potentially resulting in pathological conditions.

AIM: To investigate the seasonal changes of physical performance and the adaptation process in laboratory rats subjected to physical exercise following light desynchronization modeling, and to assess serum lactate levels under these conditions.

METHODS: The study was conducted on 240 outbred adult male Wistar rats during the autumn–winter and spring–summer periods. Experimental desynchronization was modeled by exposing the animals to either continuous bright artificial light (150 lx) or complete darkness (2–3 lx) for 10 days. To assess seasonal changes of performance, a forced swim test to exhaustion was used, administered once daily at the same time each day for five consecutive days. Serum lactate concentration was determined using a standard reagent kit.

RESULTS: A relationship was identified between physical performance and blood lactate levels in laboratory rats: higher performance was associated with lower lactate levels. The introduction of light desynchronization, combined with the swimming test, influenced the changes of lactate concentration in specific ways.

CONCLUSION: The rhythmic pattern of seasonal changes in performance and serum lactate levels following light desynchronization modeling indicates strain on the organism's adaptive–compensatory mechanisms and disruptions in metabolic processes.

Keywords: season; physical performance; forced swim test; light desynchronization; adaptation.

To cite this article:

Gostuhina AA, Zamoshina TA, Svetlik MV, Doroshenko OS, Zhukova OB, Zaitsev KV. Seasonal Changes of Physical Performance and Adaptation Process in Laboratory Rats Following Light Desynchronization Modeling. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2024;31(10):738–749. DOI: 10.17816/humeco636704
EDN: NNGVMW

Received: 04.10.2024

Accepted: 03.03.2025

Published online: 09.04.2025

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco636704>

EDN: NNGVMW

光照去同步模型下实验大鼠体能的季节性变化及其对体力活动的适应过程

Alena A. Gostuhina^{1,2}, Tatyana A. Zamoshina^{2,3}, Mikhail V. Svetlik^{2,3},
Olga S. Doroshenko^{1,3}, Oksana B. Zhukova¹, Konstantin V. Zaitsev¹

¹ Federal Scientific and Clinical Center of Medical Rehabilitation and Balneology of the Federal Medical and Biological Agency of Russia, Moscow region, Solnechnogorsk, Russia;

² Tomsk State University, Tomsk, Russia;

³ Siberian State Medical University, Tomsk, Russia

摘要

论证。过去五年中，基于动物实验与流行病学观察的研究进一步证实了光照去同步对机体具有不利影响。生物节律结构的紊乱不可避免地导致体内稳态失衡和适应能力下降，进而可能诱发病理过程。

目的。探讨在光照去同步模型条件下实验大鼠体能的季节性动态及其对体力负荷的适应过程，并评估该条件下血清乳酸水平的变化情况。

材料与方法。实验在秋冬与春夏两季进行，研究对象为240只性成熟的Wistar雄性大鼠。通过将实验动物连续10天置于全天候强光（150 lx）或完全黑暗（2-3 lx）环境中，构建光照去同步模型。为研究体能的季节性变化，采用强迫游泳至完全疲劳的方法，在每天相同时间连续五天各进行一次测试。血清乳酸浓度使用标准试剂盒法测定。

结果。结果显示，大鼠体能水平与血清乳酸浓度存在显著相关性：体能越高，乳酸水平越低。同时，光照去同步联合游泳测试对乳酸水平的变化具有一定的特异性影响。

结论。在光照去同步条件下，实验大鼠体能的季节性节律及其血清乳酸含量的变化反映出机体适应-代偿机制处于紧张状态，并提示存在代谢失调的可能。

关键词：季节；体能；强迫游泳实验；光照去同步；适应。

引用本文：

Gostuhina AA, Zamoshina TA, Svetlik MV, Doroshenko OS, Zhukova OB, Zaitsev KV. 光照去同步模型下实验大鼠体能的季节性变化及其对体力活动的适应过程. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2024;31(10):738-749. DOI: 10.17816/humeco636704 EDN: NNGVMW

收到: 04.10.2024

接受: 03.03.2025

发布日期: 09.04.2025

ОБОСНОВАНИЕ

Практическое решение проблем социально-экономического, демографического и экологического характера не может быть эффективным без научно обоснованной системы управления здоровьем человека и требует решения фундаментальных задач медико-биологического плана. Разработка данных задач неразрывно связана с обострением экологической ситуации, с жизнедеятельностью человека в условиях дизритмии, монотонии, гипокинезии, комбинированного воздействия неблагоприятных факторов среды [1].

За прошедшие пять лет появились новые данные, полученные как в экспериментах на животных, так и в эпидемиологических наблюдениях, представившие дополнительные доказательства негативного воздействия светового десинхроноза на организм [2]. С развитием современной техники жизнь человека стала очень разнообразна и на сегодняшний день профессиональная деятельность большинства людей всё чаще связана с постоянной и быстрой сменой часовых поясов (вахтовый труд, сменный график работы, спортивные соревнования, путешествия и др.). Первая реакция организма человека на любые виды перемещений в контрастные климатические условия — это снижение работоспособности и повышение энергозатрат. Сама физическая работоспособность, по мнению многих авторов, носит комплексное понятие [3, 4]. Однако именно работоспособность отражает физиологическое состояние организма и является интегральным показателем здоровья [3].

Нет никакого сомнения, что такие вопросы, как приспособление биологических объектов к изменившимся условиям среды, обеспечение защиты организма от экстремальных воздействий, компенсация нарушенных в результате патологического процесса регуляций в той или иной мере сводятся к механизмам резистентности [5]. Вместе с тем любая деятельность человека сопряжена со стрессовыми воздействиями, повышающими или понижающими устойчивость организма [5, 6]. Именно поэтому одним из перспективных направлений в регуляции гомеостаза является управление адаптационным процессом.

Цель исследования. Изучить сезонную динамику работоспособности и процесс адаптации лабораторных крыс к физической нагрузке после моделирования световых десинхронозов и оценить уровень лактата в сыворотке крови в данных условиях.

Задачи исследования:

1) изучить в середине каждого сезона года после моделирования световых десинхронозов работоспособность лабораторных крыс Wistar в плавательном тесте до полного утомления и состояние анаэробных процессов по уровню лактата в сыворотке крови;

2) проанализировать ритмическую организацию изученных параметров в указанных условиях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование выполнено в 2012 г. в периоды осень–зима, весна–лето на 240 аутбредных, половозрелых крысах-самцах стока Wistar массой 220–250 г. Животных содержали в стандартных условиях вивария Томского НИИ курортологии и физиотерапии филиала ФГБУ ФНКЦ МРИК ФМБА России при естественном световом режиме и на стандартном рационе со свободным доступом к пище и воде. Эксперименты проводили в весенний период (конец марта–начало апреля), летом (конец июня–начало июля), осенью (конец сентября–начало октября) и зимой (конец декабря–начало января). Исследование одобрено локальным этическим комитетом ФГБУН ТНИИКиФ ФМБА России (протокол № 3 от 22.03.2012) и выполнено в соответствии с этическими нормами работы с лабораторными животными и санитарными правилами по устройству, оборудованию и содержанию экспериментально-биологических клиник (директива Европейского парламента и Совета Европейского союза 2010/63/ЕС). Животных случайно разделяли на 16 групп по 10–20 особей в каждой: интактные группы — крысы, не подвергавшиеся экспериментальным воздействиям в весенний, летний, осенний и зимний периоды года в естественных условиях освещения (по 10 особей на каждый сезон года); контрольные группы — крысы, которым моделировали физическое переутомление в естественных условиях освещения в весенний, летний, осенний и зимний периоды года (по 10 особей на каждый сезон года); опытные группы — крысы, которым моделировали физическое переутомление после формирования у них экспериментального десинхроноза в виде круглосуточного освещения (СС) или темноты (ТТ) в весенний, летний, осенний и зимний периоды года (по 20 особей на каждый сезон года).

Для индукции экспериментального десинхроноза крысы опытных групп в течение 10 суток круглосуточно находились при искусственном ярком освещении (150 лк) либо при полном затемнении (2–3 лк) [7].

В качестве модели для изучения сезонной динамики работоспособности крыс использована методика принудительного плавания до полного утомления [8] в модификации [9]. Тестирование проводили однократно в одно и то же время суток (с 10:00 до 11:00 ч) в течение пяти дней подряд, в аквариуме прямоугольной формы с размерами 100×100×20 см с утяжеляющим грузом, равным по весу 10% от массы тела конкретной особи, при температуре воды 26–28 °С до полного утомления, критерием которого служили три безуспешные попытки всплыть на поверхность либо отказ от таких попыток с опусканием на дно, после чего животное извлекали из аквариума [10].

В конце эксперимента крыс декапитировали под CO₂ наркозом в соответствии с директивой Европейского парламента и Совета Европейского союза 2010/63/ЕС. Далее кровь собирали в чистую пробирку для получения сыворотки. В сыворотке крови животных колориметрическим

методом определяли концентрацию лактата [11] с использованием набора реагентов «Ольвекс диагностикум» (Санкт-Петербург) и с помощью биохимического анализатора «BiochemSA» (High Technology, США) при длине волны 500 нм.

Статистическую обработку полученных результатов проводили на основе пакета программ StatSoft Statistica 8.0. Результаты представлены в виде медианы (Me) и квартилей (Q_1 — 25%; Q_3 — 75%). Проводили анализ множественных сравнений непараметрическими тестами Фридмана и Краскала–Уолиса. Достоверность различий между группами определяли с помощью непараметрического критерия Манна–Уитни, используемого для двух независимых выборок, и критерия Вилкоксона, используемого для проверки различий между зависимыми выборками ($p < 0,05$). Для оценки характера распределений между группами применяли χ^2 .

Статистическую обработку полученных результатов по годовой динамике работоспособности и уровню лактата в сыворотке крови лабораторных крыс проводили с помощью спектрального анализа и косинор-анализа, предложенного Ф. Халбергом и модифицированного В.М. Ерошенко и А.А. Сорокиным (1980). Косинор и методы ANOVA используют для обнаружения циркадных и ультрадианных ритмов. Для данного анализа важными являются длительность наблюдения и количество объектов исследования. Суть косинор-анализа состоит в том, что на основании косинусоида, присущих отдельным индивидуумам, находят усреднённую косинусоиду, которая характерна для данной группы, и определяют доверительные интервалы, в границах которых могут меняться параметры ритмов отдельных представителей группы. Недостатком косинор-анализа является неучтённость несинусоидальной формы волны в суточных хронограммах.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При оценке динамики работоспособности после моделирования световых десинхронозов показано, что 10-суточные световые десинхронозы (СС- или ТТ-режим) существенно влияли на работоспособность, что определялось сезоном года. Весной и летом изучаемый показатель снижался, осенью повышался, а зимой — не изменялся (табл. 1).

Так, в весенний период года работоспособность крыс после световой или темновой деприваций в первый день предъявления теста увеличивалась на 40% по сравнению с контрольной группой (см. табл. 1) и была такого же уровня, как у контрольных крыс на 3–5-й дни плавательного теста. Начиная со второго дня физической нагрузки после СС- или ТТ-режима отмечали статистически значимое уменьшение работоспособности с последующей стабилизацией показателя к пятым суткам [10, 11].

В летний период наблюдали практически аналогичную закономерность изменения динамики работоспособности

крыс, как и в весенний период года (то есть уменьшение времени плавания). Однако, если в весенний период года работоспособность в 1-й день плавания была выше на 40% в сравнении с контрольной группой, то в летний период изучаемый показатель был ниже на 36%. При этом после СС-режима работоспособность оставалась стабильной на протяжении пяти дней тестирования и практически не увеличивалась. После ТТ-режима отмечали подъём работоспособности на 2-й день предъявления плавательного теста, а далее динамика показателя изменялась волнообразно и не превышала значений контрольной группы (см. табл. 1).

В осенний период года у крыс, содержащихся в условиях светового десинхроноза, в 1-й день принудительного плавания работоспособность увеличивалась на 24% по сравнению с контрольной группой (см. табл. 1). Начиная с 3-го дня физической нагрузки после СС- и ТТ-режима отмечали статистически значимое увеличение работоспособности животных с последующей стабилизацией показателя.

В зимний период года работоспособность крыс особо не изменялась по отношению к контрольной группе. После СС-режима в 1-й день плавания работоспособность имела тенденцию к уменьшению по отношению к контролю. Со 2-го по 5-й день показатель увеличивался и достигал значений контрольной группы. ТТ-режим не внёс особых изменений в динамику работоспособности лабораторных крыс. Внутри группы происходило увеличение работоспособности, однако по сравнению с контролем изучаемый показатель не менялся (см. табл. 1).

Известно, что изменение концентрации лактата прямым или косвенным образом связано с выраженной интенсификацией гликолиза, коррелирует со снижением работоспособности, что и делает этот показатель биомаркером или одним из индикаторов выполняемой нагрузки [12, 13].

Анализ содержания лактата в сыворотке крови лабораторных крыс после ежедневного предъявления плавательного теста до полного утомления в течение пяти дней показал, что изучаемый показатель в весенний период года увеличился на 38%, в летний — на 39%, в осенний — на 79%, в зимний — на 44% по сравнению с аналогичным показателем интактных животных, не получавших никаких экспериментальных воздействий [11]. Предъявление 10-суточного светового десинхроноза (СС- или ТТ-режим) влияло на уровень лактата в сыворотке крови лабораторных животных, что определялось сезоном года и видом депривации (режим освещения). Весной изучаемый показатель статистически значимо снижался по сравнению с контрольной группой, которая подвергалась плавательному тесту, но при этом не изменялся по отношению к интактной (без экспериментальных воздействий). Летом уровень лактата после СС-режима уменьшался по сравнению с контролем. Однако после ТТ-режима выявлена противоположная закономерность: уровень лактата был выше показателя интактной группы, но не изменялся

Таблица 1. Годовая динамика работоспособности и содержание лактата в сыворотке крови лабораторных крыс после моделирования световых десинхронозов**Table 1.** Annual dynamics of performance and lactate content in the blood serum of laboratory rats after modeling light desynchronization

| Период года Period of the year | Группы животных Animal groups | Продолжительность плавания, с; Me (Q1; Q3) Duration of swimming (s); Me (Q1; Q3) | | | | | Уровень лактата, ммоль/л Lactate level (mmol/l) |
|-----------------------------------|--------------------------------------|---|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--|
| | | Дни плавания Sailing days | | | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| Осень Autumn | Интактная Intact | Не подвергали плавательному тесту Not subjected to swim test | | | | | 2,2 (1,3; 3,1) |
| | Контроль (ЕО+ФН) Control (NLM+PA) | 37,5 (34; 49) | 46 (45; 57) $p_0=0,01$ | 53 (44; 67) $p_0=0,007$ | 52 (37; 58) $p_0=0,007$ | 46,5 (40; 60) $p_0=0,01$ | 4,5 (4,4; 5,1) $p_2=0,001$ |
| | СС+ФН DD+PA | 63 (54; 68) $p_1=0,001$ | 62 (56; 70,5) | 70 (66,0; 76,5) $p_0=0,001$ | 66 (59; 74) | 63,5 (56,5; 76,5) $p_0=0,04$ | 3,2 (2,0; 4,1) |
| | ТТ+ФН LD+PA | 64 (46,0; 88,5) $p_1=0,002$ | 63,5 (52; 81) | 70 (64,0; 87,5) $p_0=0,04$ | 65 (54,5; 73,5) | 65 (58,5; 78,5) | 4,0 (3,0; 4,1) |
| Зима Winter | Интактная Intact | Не подвергали плавательному тесту Not subjected to swim test | | | | | 3,4 (2,8; 4,1) |
| | Контроль (ЕО+ФН) Control (NLM+FN) | 58 (49; 66) | 55 (50; 60) | 60 (57; 62) | 60 (59; 64) | 65,5 (60; 69) | 5,2 (5,0; 5,4) |
| | СС+ФН DD+PA | 44,5 (36,0; 58,5) $p_1=0,05$ | 58,5 (47; 66) $p_0=0,01$ | 61 (54,5; 64,0) $p_0=0,008$ | 72 (60,0; 75,5) $p_0=0,001$ | 68,5 (63; 76) $p_0=0,004$ | 3,4 (3,1; 5,7) |
| | ТТ+ФН LD+PA | 51 (40,5; 61,0) | 60,5 (53,5; 72,5) $p_0=0,006$ | 58 (53,0; 68,5) $p_0=0,03$ | 65 (61,0; 75,5) $p_0=0,002$ | 65,5 (61,0; 70,5) $p_0=0,004$ | 3,8 (3,6; 4,1) |
| Весна Spring | Интактная Intact | Не подвергали плавательному тесту Not subjected to swim test | | | | | 3,2 (2,2; 3,4) |
| | Контроль (ЕО+ФН) Control (NLM+PA) | 68 (64; 77) | 74,5(63; 82) | 89,5 (75; 96) $p_0=0,05$ | 87,5 (76; 113) $p_0=0,02$ | 84 (71; 93) | 5,2 (4,9; 5,6) $p_2=0,0008$ |
| | СС+ФН DD+PA | 80 (71,0; 95,5) $p_1=0,05$ | 63 (54; 76) $p_0=0,001$ | 60 (56,5; 70,0) $p_0=0,0002$ | 61,5 (60; 79) $p_0=0,003$ | 50 (45,5; 55,0) $p_0=0,0001$ | 2,1 (1,8; 2,3) $p_3=0,0002$ |
| | ТТ+ФН LD+PA | 85,5 (70,5; 110,0) | 68,5 (61,5; 74,0) $p_0=0,02$ | 61 (53,5; 81,0) $p_0=0,05$ | 65 (55; 76) $p_0=0,01$ | 59,5 (52,5; 63,5) $p_0=0,0005$ | 2,3 (2,3; 2,3) $p_3=0,0002$ |
| Лето Summer | Интактная Intact | Не подвергали плавательному тесту Not subjected to swim test | | | | | 2,4 (2,1; 2,8) |
| | Контроль (ЕО+ФН) Control (NLM+PA) | 72 (60; 82) | 78,5 (59; 90) | 62 (52; 83) | 59 (50; 62) | 70 (61; 82) | 4,6 (3,5; 7,2) $p_2=0,0002$ |
| | СС+ФН DD+PA | 50 (43; 60) $p_1=0,008$ | 50 (46,5; 66,0) | 47 (40,5; 55,5) | 46,5 (39; 52) | 51 (44; 60) | 2,8 (2,6; 3,1) $p_3=0,0002$ |
| | ТТ+ФН LD+PA | 40 (34,5; 49,0) $p_1=0,00001$ | 49 (43,0; 51,5) $p_0=0,006$ | 44,5 (38,0; 58,5) | 48 (43; 50) $p_0=0,0001$ | 46,5 (40,0; 51,5) | 4 (3,4; 4,3) $p_2=0,0002$ |

Примечание. ЕО — естественный режим освещения, ФН — физическая нагрузка, СС — темновая депривация (животные на круглосуточном освещении), ТТ — световая депривация (животные круглосуточно в темноте); p_0 — уровень статистической значимости по отношению к первому дню плавания соответствующей группы, p_1 — уровень статистической значимости по отношению к контрольной группе в первый день, p_2 — уровень статистической значимости по отношению к интактной группе, p_3 — уровень статистической значимости по отношению к контрольной группе.

Note. NLM — natural lighting mode, PA — physical activity, DD — dark deprivation (animals on 24-hour lighting), LD — light deprivation (animals in the dark 24 hours); p_0 — level of statistical significance in relation to the first day of swimming corresponding to the group, p_1 — level of statistical significance in relation to the control group on the first day, p_2 — level of statistical significance in relation to the intact group, p_3 — level of statistical significance in relation to the control group.

по отношению к контролю (см. табл. 1). Осенью и зимой статистически значимых отличий не выявлено. Следует отметить, что в зимний период года изучаемый показатель не превышал значений интактной группы.

Возник следующий вопрос: выявленные сезонные особенности являются отражением годового ритма

работоспособности и анаэробных процессов? Для доказательства этого предположения далее была проведена проверка полученных результатов на ритмичность с помощью косинор-анализа.

Проведённые спектральный и косинор-анализы сезонной динамики работоспособности показали,

что у контрольной группы животных в спектре ритмов работоспособности в 1-й день предъявления плавательного теста присутствовали доминирующая годовая гармоника (12 мес.) с акрофазой, приходящейся на начало мая, и субдоминантная (7 мес.) составляющая (табл. 2). Во 2, 4 и 5-й дни плавания в спектре ритмов работоспособности этой группы также присутствовали доминантные годовые ритмы (12 мес.) с акрофазами, приходящими на конец апреля–начало мая, и субдоминантные 7, 8, 8,5 мес. гармоника с размытыми акрофазами. Однако на 3-й день тестирования в спектре присутствовала только годовая гармоника с акрофазой, приходящейся на апрель. При этом мезор ритмов во все дни плавания

оставался практически без изменений, а амплитуда понижалась, но не значительно (см. табл. 2).

При сочетанной нагрузке (СС-режим и принудительное плавание) в спектре ритма работоспособности в 1-й день тестирования наблюдали только годовой ритм (12 мес.) с акрофазой, приходящейся на апрель. В последующие дни тестирования (2–5-й дни плавания) в спектрах ритмов работоспособности отмечали как доминантные годовые (3, 4, 5-й дни плавания) и окологодные 11 мес. (2-й день плавания) гармоника с очень размытыми акрофазами, распределяющимися с ноября по январь, так и субдоминантные 7,5 и 8 ч составляющие. При этом мезор ритмов во все дни эксперимента существенно не изменялся

Таблица 2. Ритмическая организация работоспособности лабораторных крыс после световых десинхронозов и физической нагрузки в разные сезоны года

Table 2. Rhythmic organization of the performance of laboratory rats after light desynchronization and physical exercise in different seasons of the year

| Группа животных Animal groups | Дни исследования Days of research | Период ритма (месяцы) Rhythm period (months) | Мезор Mesor | Амплитуда Amplitude | Акрофаза (месяц) Acrophase (month) | |
|---|--------------------------------------|---|--------------------|------------------------|---------------------------------------|------------------|
| Контроль (ЕО+ФН) Control (NLM+PA) | 1 | 12 | 59,1±1,8 | 16 (8,8; 25,3) | 4,13 (3,6; 5,5) | |
| | | 7 | 63,8±2,9 | 31,3 (27,1; 35,5) | 2,3 (1,7; 2,7) | |
| | 2 | 12 | 64,1±2,8 | 16,4 (7,6; 25,2) | 4,7 (3,8; 5,6) | |
| | | 8 | 69,7±3,1 | 17,3 (6,6; 27,9) | 6,7 (6,3; 7,3) | |
| | 3 | 12 | 66,6±2,7 | 14,4 (5,5; 23,3) | 3,7 (2,7; 6,2) | |
| | | 4 | 12 | 66,3±2,7 | 19,6 (2,4; 36,8) | 3,2 (1,7; 4,1) |
| | 5 | | 7 | 76,9±4,01 | 46,04 (42,2; 49,9) | 2,7 (2,2; 3,3) |
| | | 12 | 68,5±2,06 | 16,7 (5,02; 28,5) | 3,7 (3,2; 5,7) | |
| | СС+ФН DD+PA | 1 | 12 | 63,4±3,2 | 18,1 (6,8; 29,4) | 3,6 (2,7; 4,6) |
| | | | 2 | 6,03±2,2 | 11,2 (4,6; 17,9) | 10,7 (10,0; 0,8) |
| 3 | | 8 | 59,03±2,07 | 15,8 (5,7; 25,9) | 7,2 (6,8; 0,13) | |
| | | 12 | 60,9±1,2 | 6,5 (2,3; 10,8) | 10,7 (9,7; 0,7) | |
| 4 | | 8 | 57,1±1,5 | 10,6 (6,7; 14,5) | 7,8 (7,6; 0,7) | |
| | | 12 | 63,0±1,3 | 12,4 (8,4; 16,3) | 0,3 (11,7; 1,3) | |
| 5 | | 8 | 61,4±1,8 | 15,3 (10,5; 20,04) | 0,6 (0,2; 1,1) | |
| | | 12 | 61,7±1,6 | 10,3 (4,3; 16,2) | 11,7 (10,5; 1,2) | |
| 8 | | 59,4±1,9 | 26,4 (18,4; 34,3) | 0,5 (7,2; 0,2) | | |
| | | ТТ+ФН LD+PA | 1 | Нет ритма No rhythm | | |
| 2 | Нет ритма No rhythm | | | | | |
| 3 | 12 | | 64,0±1,8 | 9 (2,0; 16,3) | 10,7 (9,7; 2,2) | |
| | 8 | | 58,2±1,3 | 7,4 (1,6; 13,3) | 0,6 (7,6; 2,7) | |
| 4 | 12 | | 62,9±1,9 | 9,3 (5,4; 13,1) | 0,2 (10,8; 1,6) | |
| | 8,5 | 61,2±1,9 | 10,3 (6,0,5; 14,5) | 0,8 (0,2; 1,8) | | |
| 5 | 12 | 59,9±1,3 | 10,3 (6,1; 15,0) | 11,3 (10,6; 0,7) | | |

Примечание. ЕО — естественный режим освещения, ФН — физическая нагрузка, СС — темновая депривация (животные на круглосуточном освещении), ТТ — световая депривация (животные круглосуточно в темноте).

Note. NLM — natural lighting mode, PA — physical activity, DD — dark deprivation (animals in 24-hour lighting), LD — light deprivation (animals in the dark 24 hours a day).

и не отличался от аналогичного показателя в контрольной группе. Следует отметить, что амплитуда годового ритма работоспособности значительно понижалась к 3-му дню плавания, а в последующие дни постепенно нарастала, но не достигала значения данного показателя в 1-й день тестирования (см. табл. 2).

Биоритмологический анализ работоспособности после ТТ-режима и плавательного теста показал, что в первые два дня плавания отсутствовала какая-либо ритмика. С 3-го дня тестирования отмечали как доминантные годовые (12 мес.) составляющие с акрофазой с ноября по январь, так и субдоминантные 8, 8,5 мес. гармоник. Мезор и амплитуда выявленных гармоник во все изучаемые сроки были без особых отличий (см. табл. 2).

Косинор-анализ сезонного содержания лактата в сыворотке крови лабораторных животных показал, что у интактной группы в спектре ритмов содержания лактата присутствовали доминирующая годовая гармоника (12 мес.) с акрофазой, приходящейся на январь, и субдоминантная 8-месячная составляющая (табл. 3). В контрольной группе животных в спектре ритмов содержания лактата отмечали только субдоминантную 8-месячную составляющую. При этом мезор ритмов незначительно увеличивался аналогично показателю в интактной группе, а амплитуда не изменялась (см. табл. 3).

При сочетанном воздействии стресс-факторов (СС-режим и принудительное плавание) в спектре ритма содержания лактата наблюдали как доминантную годовую (12 мес.) составляющую с акрофазой на начало ноября, так и субдоминантную 8-месячную гармонику. Мезор выявленных гармоник был без особых отличий, а амплитуда увеличивалась в сравнении с интактной группой. Однако мезор субдоминантной 8-месячной гармоник по отношению к контрольной группе уменьшался, а амплитуда оставалась без особых изменений (см. табл. 3).

После воздействия ТТ-режима и плавательного теста в спектре ритмов содержания лактата наблюдали также доминантную годовую (12 мес.) составляющую с акрофазой только на начало октября и субдоминантную 8-месячную гармонику. Следует отметить, что мезор и амплитуда доминантной годовой (12 мес.) составляющей оставались без особых изменений в сравнении с интактной группой. Мезор субдоминантной 8-месячной гармоник по отношению к интактной группе не изменялся, при этом к контрольной уменьшался. Амплитуда увеличивалась в сравнении с интактной и с контрольной группами (см. табл. 3).

Таким образом, наблюдаемая картина в ритмической структуре сезонной динамики работоспособности и содержания лактата в сыворотке крови животных, перенесших световой десинхроноз, свидетельствует о напряжении адаптивно-компенсаторных возможностей организма и о нарушении метаболических процессов у лабораторных крыс.

ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящем исследовании удалось продемонстрировать особенности ритмической организации готовой динамики работоспособности и уровня лактата в сыворотке крови, а также процесс адаптации лабораторных крыс к физической нагрузке в условия световых десинхронозов.

Полученные результаты свидетельствуют как о сезонных особенностях динамики работоспособности крыс на протяжении пяти последовательных дней предъявления плавательного теста, так и об общих закономерностях во все сезоны года. Вне зависимости от сезона работоспособность крыс нарастала постепенно от 1-го к 5-му дню и в целом соответствовала первым двум фазам адаптации (тревога и резистентность) к физическим нагрузкам [6, 11].

Таблица 3. Ритмическая организация содержания лактата в сыворотке крови лабораторных крыс после световых десинхронозов и физической нагрузки в разные сезоны года

Table 3. Rhythmic organization of lactate content in the blood serum of laboratory rats after light desynchronization and physical exercise in different seasons of the year

| Группа Group | Период ритма (месяц) Rhythm period (month) | Мезор Mesor | Амплитуда Amplitude | Акрофаза (месяц) Acrophase (month) |
|--------------------------------------|---|----------------|------------------------|---------------------------------------|
| Интактная Intact | 8 | 3,00±0,17 | 0,9 (0,3; 1,6) | 0,1 (7,3; 0,7) |
| | 12 | 2,84±0,17 | 0,5 (0,3; 1,0) | 1,2 (11,0; 4,1) |
| Контроль (ЕО+ФН) Control (NLM+PA) | 8 | 5,1±0,3 | 1,3 (0,5; 2,1) | 7,3 (6,5; 1,2) |
| СС+ФН DD+PA | 8 | 3,03±0,21 | 1,8 (1,0; 2,6) | 7,5 (7,3; 0,1) |
| | 12 | 3,17±0,16 | 0,9 (0,4; 1,3) | 10,4 (9,2; 11,5) |
| ТТ+ФН LD+PA | 8 | 3,49±0,1 | 2,28 (1,8; 2,7) | 7,3 (7,1; 7,4) |
| | 12 | 3,62±0,13 | 0,83 (0,4; 1,3) | 9,2 (8,2; 10,5) |

Примечание. ЕО — естественный режим освещения, ФН — физическая нагрузка, СС — темновая депривация (животные на круглосуточном освещении), ТТ — световая депривация (животные круглосуточно в темноте).

Note. NLM — natural lighting mode, PA — physical activity, DD — dark deprivation (animals on 24-hour lighting), LD — light deprivation (animals in darkness 24 hours).

Что касается динамики работоспособности крыс на протяжении пяти последовательных дней предъявления плавательного теста в условиях световых десинхронозов, то изучаемый показатель зависел как от сезона года, так и от вида депривации (СС- или ТТ-режим). Весной и летом изучаемый показатель понижался, осенью повышался, а зимой — не изменялся. Весной и летом работоспособность лабораторных крыс, подвергавшихся физической нагрузке после формирования у них экспериментального десинхроноза в виде круглосуточного освещения или круглосуточной темноты, понижалась и становилась в последующие дни тестирования ниже, чем исходная работоспособность в контрольной группе. При этом весной в 1-й день плавания у крыс после моделирования светового десинхроноза работоспособность по сравнению с контрольной группой увеличивалась, а летом, наоборот, уменьшалась.

Полученные результаты подтверждают известную гипотезу Ф.З. Меерсона о том, что адаптация к одним стрессорным ситуациям может повышать устойчивость организма к другим [6]. Однако в нашем случае она проявилась наилучшим образом только весной при первых предъявлениях принудительного плавательного теста с нагрузкой после отмены деприваций. Можно предположить, что световой десинхроноз адаптировал животных к последующей физической нагрузке, о чём и свидетельствовало увеличение времени плавания крыс в первые дни предъявления нагрузок. В дальнейшем на фоне светового десинхроноза при многократном воздействии стрессующего фактора в виде плавательной нагрузки у животных развивались утомление и, возможно, стадия тревоги или истощения. Также при оценке комбинированного действия стресс-факторов на организм учитываются прежде всего количественные характеристики всех видов воздействий. Следовательно, можно предположить о взаимоусугубляющей роли отдельных факторов и потенцировании их биологического эффекта при сочетании воздействий.

Зимой изучаемый показатель в условиях светового десинхроноза не изменялся по отношению к контрольной группе к 5-му дню предъявления плавательного теста. При этом внутри группы как на СС-, так и ТТ-режимах наблюдали увеличение работоспособности по отношению к первому проявлению плавательного теста.

Согласно Ф.З. Меерсону, полученные результаты работоспособности крыс в данных условиях соответствуют первой фазе «срочной» адаптации. Как описывает Ф.З. Меерсон, на данной стадии в зависимости от вида мышечной работы двигательный ответ нетренированного организма может быть либо недостаточно мощным по силе, либо менее продолжительным по времени. В ответ на нагрузку происходит интенсивное возбуждение корковых, подкорковых и нижележащих двигательных центров, ответственных за двигательную реакцию [6]. Этот процесс формирует первую стадию новых условно

рефлекторных двигательных навыков и может сопровождаться ярко выраженной стресс-реакцией за счёт активации стресс-реализующей системы [11]. Результатами этой реакции являются мобилизация энергетических ресурсов организма, их перераспределение в органы и ткани функциональной системы адаптации, а также формирование структурной основы долговременной адаптации [6]. Осенью выявлены совершенно другие особенности изменения работоспособности. Исходный уровень показателя оказался самым низким по сравнению с другими сезонами года. Предварительное помещение лабораторных крыс в условия светового десинхроноза способствовало увеличению работоспособности уже с 1-го дня предъявления плавательного теста с достижением максимума к 3-му дню и с последующей стабилизацией показателя по сравнению с контрольной группой. Следовательно, как один стрессорный фактор в виде плавательного теста, так и сочетание повышали устойчивость к последующей нагрузке, поэтому работоспособность животных от первого дня к последующим нарастала. Следовательно, тренировочный процесс характерен для динамики работоспособности крыс в этот сезон.

Таким образом, адаптация организма крыс к физическим нагрузкам в условиях светового десинхроноза в разные сезоны года развивается неодинаково. Это может быть связано с разным исходным уровнем кортикостерона, который, по литературным данным [11, 14], характеризует разную степень адаптивных возможностей организма. Другой причиной может быть выраженность десинхроноза, которая зависит от предыстории, то есть от светового режима до деприваций [7, 15], а также от величины и направления фазового сдвига [16].

Считается, что биохимическая индивидуальность первична, а интегральные показатели функционирования организма являются её отражением [10, 17]. Долгое время лактат считался токсичным побочным продуктом гликолиза, являющимся причиной усталости и отрицательно влияющим на результаты [13, 17, 18]. Однако повышенная концентрация лактата в крови является обычным явлением при физиологическом (физическая нагрузка) и патофизиологическом стрессе (стрессовая гиперлактатемия). Повышенная выработка лактата, по-видимому, является эволюционно сохранённым защитным механизмом, который обеспечивает организм энергетическим субстратом для глюконеогенеза, чтобы сохранить нормальную работу мышц и внутренних органов [17]. С другой стороны, известно, что производство лактата может с большей вероятностью отсрочить начало ацидоза. Повышение концентрации лактата хотя и не является причиной, совпадает с клеточным ацидозом и остаётся хорошим косвенным маркером возникновения усталости. Развитие утомления в целом имеет комплексную природу, обусловленную изменением концентрации различных метаболитов и ионов, изменением величины мембранных

потенциалов и возбудимости. Накопление лактата — это скорее следствие, а не причина внутриклеточных условий, способствующих ацидозу. Сам лактат никак не ограничивает работоспособность, более того — увеличивает её [19].

Таким образом, изменение концентрации лактата прямым или косвенным образом связано с выраженной интенсификацией гликолиза, коррелирует со снижением работоспособности, что и делает этот показатель биомаркером выполняемой нагрузки.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о том, что работоспособность лабораторных крыс и содержание лактата в их крови взаимосвязаны. Чем выше работоспособность, тем ниже уровень лактата. При этом предъявление светового десинхроноза в сочетании с плавательным тестом внесли свои особенности в изменения уровня лактата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изучена сезонная динамика работоспособности в плавательном тесте с нагрузкой до полного утомления и процесс адаптации лабораторных крыс к физической нагрузке на протяжении пяти последовательных дней предъявления. Установлено, что работоспособность крыс контрольной группы при первом предъявлении плавательного теста с нагрузкой оказалась наиболее выраженной в весенний и летний периоды года, а их адаптивные возможности наилучшим образом проявились весной. В то же время у животных опытных групп, подвергавшихся до первого предъявления плавательного теста СС- или ТТ-режиму (10 дней), изученные показатели изменялись иначе. У группы после СС-режима в 1-й день плавания с нагрузкой работоспособность в осенний и весенний периоды года увеличивалась, а в зимний и летний — понижалась в сравнении с контролем. При этом работоспособность животных и содержание лактата в их крови взаимосвязаны. Чем выше работоспособность, тем ниже уровень лактата. Предъявление светового десинхроноза в сочетании с плавательным тестом внесло свои особенности в изменения уровня лактата.

Косинор-анализ показал, что выявленные сезонные особенности изменения динамики работоспособности лабораторных крыс после моделирования световых десинхронозов являются отражением годового ритма самой работоспособности.

Следует вывод, что частая и резкая смена часовых поясов, а значит и режимов освещения, приводит к нарушениям не только суточной ритмичности физиологических функций, в том числе и работоспособности, что ранее было известно, но и годовой. Расшатывание структуры ритмической организации неизменно приводит к расшатыванию гомеостаза и ослаблению адаптивных возможностей организма, что может привести к развитию патологических процессов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Т.А. Замощина — анализ литературных данных в системах Scopus и РИНЦ по представленной тематике, анализ и интерпретация полученных результатов, существенная переработка статьи на предмет важного интеллектуального содержания; А.А. Гостюхина — проведение экспериментальной и аналитической части исследования, анализ и интерпретация данных, подготовка первого варианта статьи; К.В. Зайцев — разработка концепции и дизайна экспериментальной части; М.В. Светлик — статистическая обработка полученных результатов; О.С. Дорошенко — участие в наборе первичного материала, проведение экспериментальной части исследования; О.Б. Жукова — разработка концепции и дизайна экспериментальной части, редактирование статьи. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведения исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Этическая экспертиза. Исследование одобрено локальным этическим комитетом ФГБУН ТНИИКиФ ФМБА России (протокол № 3 от 22.03.2012) и выполнено в соответствии с этическими нормами работы с лабораторными животными и санитарными правилами по устройству, оборудованию и содержанию экспериментально-биологических клиник (директива Европейского парламента и Совета Европейского союза 2010/63/ЕС).

Источники финансирования. Научное исследование проведено в рамках Государственного задания ФМБА России.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. T.A. Zamoshina — analysis of literary data in Scopus and RINTS systems on the presented topic, analysis and interpretation of the results, substantially revised the article for important intellectual content; A.A. Gostuhina — conducting the experimental and analytical parts of the study, analysis and interpretation of data, preparation of the first version of the article; K.V. Zaitsev — development of the concept and design of the experimental part; M.V. Svetlik — statistical processing of the results; O.S. Doroshenko — participated in the collection of primary material, conducting the experimental part of the study; O.B. Zhukova — development of the concept and design of the experimental part, participated in editing the article. All authors confirm that their authorship meets the international ICMJE criteria (all authors made a significant contribution to the development of the concept, conduct of the study, and preparation of the article, read and approved the final version before publication).

Ethical expertise. The study was approved by the local ethics committee of the Federal State Budgetary Scientific Institution TNIiKiF FMBA of Russia (protocol No. 3 of 22.03.2012) and was carried out in accordance with the ethical standards for working with laboratory animals and sanitary rules for the design, equipment and maintenance of experimental biological clinics (Directive of the European Parliament and of the Council of the European Union 2010/63/E).

Funding sources. The scientific research was conducted within the framework of the State assignment of the Federal Medical and Biological Agency of Russia.

Disclosure of interests. The authors have no relationships, activities or interests for the last three years related with for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality. In creating this work, the authors did not use previously published information (text, illustrations, data).

Data availability statement. The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work, and no new data was collected or created.

Generative AI. Generative AI technologies were not used for this article creation.

Provenance and peer-review. This paper was submitted to the journal on an unsolicited basis and reviewed according to the usual procedure. Two external reviewers, a member of the editorial board, and the scientific editor of the publication participated in the review.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

- Rakhmanin YuA, Dodina NS, Alekseeva AV. Modern methodological approaches to assessing public health risks due to chemicals exposure. *Health Risk Analysis*. 2023;(4):33–41. doi: 10.21668/health.risk/2023.4.03 EDN: PXEKFB
- Anisimov VN. Light, aging, and cancer. *Priroda*. 2018;(6):19–22. EDN: XQNOMP
- Okovity SV, Shustov EB, Bolotova VTs. *Working capacity, fatigue, correction*. Moscow: Knorus; 2019. 330 p. (In Russ.)
- Samoylov AS, Razinkin SM, Kish AA, et al. Rationale of a method of examination of physical capacity of athletes" of the Russian national rowing team. *Sports Medicine: Science and Practice*. 2016;6(2):46–53. doi: 10.17238/ISSN2223-2524.2016.2.46 EDN: WLKHGX
- Bolotin AE, Aganov SS, Udalykh AS, Davidenko DN. *Technology of formation of healthy lifestyle skills among students in higher education institutions of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia*. St. Petersburg: FGBOU VO St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia; 2019. 203 p. (In Russ.) EDN: RFCOWP
- Meerson FZ, Pshennikova MG. *Adaptation to stressful situations and physical exertion*. Moscow: Meditsina; 1988. 253 p. (In Russ.)
- Doroshenko OS, Zamoshchina TA, Gostyukhina AA, et al. Peculiarities of adaptive-adaptive reactions of laboratory animals to multicomponent stress in the winter period of the year. *Tomsk State University Journal of Biology*. 2024;(68):143–156. doi: 10.17223/19988591/68/8 EDN: VZMMMI
- Volchegorsky IA, Dolgushin II, Kolesnikov OL, Tseilikman VE. *Experimental modeling and laboratory evaluation of adaptive reactions of the organism*. Chelyabinsk: ChSPU; 2000. 167 p. EDN: MLPRZJ
- Patent RUS № 2617206/23/28 (2006/01). Byul. 12. Gostyukhina AA, Zaitsev KV, Zamoshchina T, et al. *Method for modeling physical overfatigue in rats under conditions of desynchronoses*. Date of Availability from: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002617206_20170421_C2_RU (In Russ.)
- Zamoshchina TA, Gostyukhina AA, Zaitsev KV, et al. Seasonal variations in working capacity and serum lactate concentration in laboratory rats. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2020;27(10):17–22. doi: 10.33396/1728-0869-2020-10-17-22 EDN: WSWJRE
- Gostyukhina AA, Zamoshchina TA, Zaitsev KV, et al. Adaptive reactions of rats after light desynchronization and physical overwork. *Bulletin of Siberian Medicine*. 2018;17(3):22–34. doi: 10.20538/1682-0363-2018-3-22-34 EDN: YLEPNB
- Fedotova EV, Sidelev PA. *Theoretical foundations and practical aspects of high-intensity interval training*. Moscow: Pero; 2024. 184 p. (In Russ.)
- Wang CC, Fang CC, Lee YH, et al. Effects of 4-week creatine supplementation combined with complex training on muscle damage and sport performance. *Nutrients*. 2018;10(11):1640. doi: 10.3390/nu10111640
- Gostyukhina AA, Zaitsev KV, Zamoshchina TA, et al. Seasonal features of corticosterone content in rat blood serum after physical overfatigue under conditions of light desynchronization. *Russian Journal of Physiology*. 2016;102(1):50–55. EDN: VEALRL
- Batotsyrenova EG. *Biochemical mechanisms of pharmacological correction of the functional state of the body under conditions of light desynchronization (experimental study)* [dissertation]. St. Petersburg; 2024. 348 p. (In Russ.)
- de Oliveira Melo NC, Cuevas-Sierra A, Souto VF, Martínez JA. Biological rhythms, chrono-nutrition, and gut microbiota: epigenomics insights for precision nutrition and metabolic health. *Biomolecules*. 2024;14(5):559. doi: 10.3390/biom14050559
- Kolotyeva NA, Gilmiyarova FN. The role of small molecules in metabolism regulation (review of literature). *Clinical Laboratory Diagnostics*. 2019;64(12):716–722. doi: 0.18821/0869-2084-2019-64-12-716-722 EDN: YBGBCR
- Yang S, He Q, Shi L, Wu Y. Impact of Antarctic krill oil supplementation on skeletal muscle injury recovery after resistance exercise. *Eur J Nutr*. 2023;62(3):1345–1356. doi: 10.1007/s00394-022-03077
- Che K, Yang Y, Zhang J, Feng L, et al. Oral pyruvate prevents high-intensity interval exercise-induced metabolic acidosis in rats by promoting lactate dehydrogenase reaction. *Front Nutr*. 2023;10:1096986. doi: 10.3389/fnut.2023.1096986

ОБ АВТОРАХ

* **Гостюхина Алена Анатольевна**, канд. биол. наук;
адрес: Россия, 634009, Томск, ул. Розы Люксембург, д. 1;
ORCID: 0000-0003-3655-6505;
eLibrary SPIN: 1036-5936;
e-mail: antariks-tomsk2015@yandex.ru

Замощина Татьяна Алексеевна, д-р биол. наук, профессор;
ORCID: 0000-0003-1868-9793;
eLibrary SPIN: 7391-5386;
e-mail: beladona2015@yandex.ru

Светлик Михаил Васильевич, канд. биол. наук;
ORCID: 0000-0003-0990-2580;
eLibrary SPIN: 1863-7282;
e-mail: mihasv@mail.tsu.ru

AUTHORS' INFO

* **Alena A. Gostuhina**, Cand. Sci. (Biology);
address: 1 Rosa Luxemburg st, Tomsk, Russia, 634009;
ORCID: 0000-0003-3655-6505;
eLibrary SPIN: 1036-5936;
e-mail: antariks-tomsk2015@yandex.ru

Tatyana A. Zamoshina, Dr. Sci. (Biology), Professor;
ORCID: 0000-0003-1868-9793;
eLibrary SPIN: 7391-5386;
e-mail: beladona2015@yandex.ru

Mikhail V. Svetlik, Cand. Sci. (Biology);
ORCID: 0000-0003-0990-2580;
eLibrary SPIN: 1863-7282;
e-mail: mihasv@mail.tsu.ru

Дорошенко Ольга Сергеевна;

ORCID: 0000-0003-4764-4842;

eLibrary SPIN: 4132-6216;

e-mail: doroshenko.olga.95@mail.ru

Жукова Оксана Борисовна, д-р мед. наук;

ORCID: 0000-0001-5016-7288;

eLibrary SPIN: 5586-3475;

e-mail: limdff@yandex.ru

Зайцев Константин Васильевич, канд. мед. наук;

ORCID: 0000-0001-6504-5232;

eLibrary SPIN: 5010-9381;

e-mail: limdff@yandex.ru

Olga S. Doroshenko;

ORCID: 0000-0003-4764-4842;

eLibrary SPIN: 4132-6216;

e-mail: doroshenko.olga.95@mail.ru

Oksana B. Zhukova, MD, Dr. Sci. (Medicine);

ORCID: 0000-0001-5016-7288;

eLibrary SPIN: 5586-3475;

e-mail: limdff@yandex.ru

Konstantin V. Zaitsev, MD, Cand. Sci. (Medicine);

ORCID: 0000-0001-6504-5232;

eLibrary SPIN: 5010-9381;

e-mail: limdff@yandex.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author