



Сочетанное действие питьевой минеральной воды и низкоинтенсивного электромагнитного излучения на семенники крыс при метаболическом синдроме

Королев Ю.Н.*, Михайлик Л.В., Никулина Л.А.

Национальный медицинский исследовательский центр реабилитации и курортологии Минздрава России, Москва, Россия

РЕЗЮМЕ

ВВЕДЕНИЕ. Для коррекции нарушений в органах мужской репродуктивной системы при метаболическом синдроме представляется целесообразным использовать на экспериментальной модели этого заболевания сочетанное действие природных и искусственных лечебных физических факторов – питьевой минеральной воды и низкоинтенсивного электромагнитного излучения сверхвысокой частоты. Эти факторы обладают антиоксидантным, цитопротекторным и регенеративным действием и способны оказывать широкий спектр влияния на различные адаптационно-защитные механизмы регуляции.

ЦЕЛЬ. Выявить развитие метаболических и структурных адаптационно-защитных реакций в семенниках крыс при сочетанном действии питьевой сульфатной питьевой минеральной воды и низкоинтенсивного электромагнитного излучения сверхвысокой частоты при экспериментальном моделировании метаболического синдрома.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ. Эксперименты проведены на 26 нелинейных крысах-самцах массой 180-200 г. Модель метаболического синдрома воспроизводилась в течение 60 дней с применением высококалорийной диеты. Крысы были разделены на 3 группы: 1-я (опытная) – крысы получали питьевую сульфатную питьевую минеральную воду в сочетании с низкоинтенсивным электромагнитным излучением сверхвысокой частоты на фоне применения высококалорийной диеты; 2-я (контрольная) – крысы получали только высококалорийную диету; 3-я (интактная) – крысы без каких-либо воздействий. Методы исследования: биохимические, светооптические, морфометрические, электронная микроскопия. Достоверность различий оценивали с помощью t-критерия Стьюдента.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Установлено, что сочетанное действие питьевой сульфатной минеральной воды и низкоинтенсивного электромагнитного излучения сверхвысокой частоты способствовало усилению ряда адаптационно-защитных реакций в семенниках крыс на фоне применения высококалорийной диеты. В основном они проявлялись в активации антиоксидантной защиты и белкового синтеза, улучшении процессов дифференцировки сперматогенных клеток и увеличении их числа, усилении клеточной и внутриклеточной регенерации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Полученные данные могут быть использованы в разработке новых подходов к способам усиления адаптационно-защитных и компенсаторно-восстановительных процессов в органах мужской репродуктивной системы при метаболическом синдроме.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: метаболический синдром, экспериментальное исследование, питьевая минеральная вода, низкоинтенсивное электромагнитное излучение, сочетанное действие, семенники, адаптация

Для цитирования: Korolev Yu.N., Mikhailik L.V., Nikulina L.A. Drinking Mineral Water and Low-Intensity Electromagnetic Radiation Combinational Effect on Rat Testes in Metabolic Syndrome: a Randomized Controlled Study. *Bulletin of Rehabilitation Medicine*. 2022; 21 (6): 127-133. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2022-21-6-127-133>

*Для корреспонденции: Королев Юрий Николаевич, e-mail: korolev.yur@yandex.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-5530-1538>

Статья получена: 03.12.2021

Поступила после рецензирования: 05.10.2022

Статья принята к печати: 14.11.2022

Drinking Mineral Water and Low-Intensity Electromagnetic Radiation Combinational Effect on Rat Testes in Metabolic Syndrome: a Randomized Controlled Study

Yury N. Korolev*, Lyubov V. Mikhailik, Lyudmila A. Nikulina

National Medical Research Center of Rehabilitation and Balneology, Moscow, Russia Federation

ABSTRACT

INTRODUCTION. To correct disorders in the male reproductive system organs in the metabolic syndrome, it seems reasonable to use a combined effect of natural and artificial therapeutic physical factors – drinking mineral water and low-intensity electromagnetic interference of ultrahigh frequency – on an experimental model of this disease. These factors have antioxidant, cytoprotective and regenerative effects and can have a wide range of effects on various adaptation and protective regulatory mechanisms.

AIM. To reveal the development of metabolic and structural adaptation-protective reactions in rat testes under the combined effect of drinking sulphate mineral water and low-intensity electromagnetic radiation microwave in experimental simulation of metabolic syndrome.

MATERIAL AND METHODS. The experiments were performed on 26 nonlinear male rats weighing 180-200g. The metabolic syndrome model was reproduced for 60 days using a high-caloric diet. The rats were divided into 3 groups: 1st (experimental)-rats received drinking sulfate mineral water in combination with microwave electromagnetic radiation against the background of a high-calorie diet; 2nd (control) – rats received only a high-calorie diet; 3rd (intact) – rats without any influences. Research methods: biochemical, light-optical, morphometric, electron microscopy. Significance of differences was assessed by Student's t-test.

RESULTS AND DISCUSSION. It was found that the combinational effect of drinking sulfate mineral water and low-intensity electromagnetic radiation microwave contributed to the enhancement of a number of adaptive and protective reactions in the testes of rats against the background of a high-caloric diet. They were mainly manifested in the activation of antioxidant protection and protein synthesis, improvement of spermatogenic cells differentiation processes and increase in their number, enhancement of cellular and intracellular regeneration.

CONCLUSION. The data obtained can be used in the development of new approaches to the methods of adaptation-protective and compensatory-restorative processes enhancement in the organs of the male reproductive system in metabolic syndrome.

KEYWORDS: metabolic syndrome, mineral water, low-intensity electromagnetic radiation, testis

For citation: Korolev Yu.N., Mikhailik L.V., Nikulina L.A. Drinking Mineral Water and Low-Intensity Electromagnetic Radiation Combinational Effect on Rat Testes in Metabolic Syndrome: a Randomized Controlled Study. *Bulletin of Rehabilitation Medicine*. 2022; 21 (6): 127-133. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2022-21-6-127-133>

***For correspondence:** Yuri N. Korolev, e-mail: korolev.yur@yandex.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-5530-1538>

Received: Dec 03, 2021

Revised: Oct 05, 2022

Accepted: Nov 14, 2022

ВВЕДЕНИЕ

При развитии метаболического синдрома, который представляет собой сложный комплекс метаболических нарушений, изменениям подвергаются различные органы и ткани организма, в том числе мужская репродуктивная система [1-7]. Для коррекции этих нарушений представляется целесообразным использовать сочетанное применение лечебных немедикаментозных факторов, которые способны оказать широкий спектр влияния на различные нейроэндокринные и гуморальные механизмы регуляции и повысить адаптационные возможности организма. В этом плане перспективным может быть применение природных и искусственных лечебных физических факторов – питьевой минеральной воды (МВ) и низкоинтенсивного электромагнитного излучения (ЭМИ) сверхвысокой частоты (СВЧ), обладающих в той или иной мере антиоксидантным, цитопротекторным и регенеративным действиями [8-10]. В настоящей работе выявление адаптационно-защитных реакций при сочетанном действии этих факторов осуществлялось на экспериментальной модели

метаболического синдрома, индуцированного высококалорийной диетой, которая способна воспроизвести основные признаки этого заболевания [11-16]. Коррекцию метаболических сдвигов начинали проводить на раннем этапе развития модели с применением питьевой МВ, что было связано с детоксицирующими и антиоксидантными свойствами этого фактора и возможностью повысить активность адаптационных процессов в этот период. ЭМИ СВЧ применяли в более поздний период на область проекции надпочечников для усиления механизмов нейрогормональной регуляции защитных компенсаторно-приспособительных реакций организма [8].

ЦЕЛЬ

Выявить развитие метаболических и структурных адаптационно-защитных реакций в семенниках крыс при сочетанном действии питьевой сульфатной МВ и низкоинтенсивного ЭМИ СВЧ при экспериментальном моделировании метаболического синдрома.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Эксперименты проведены на 24 нелинейных крысах-самцах массой 180-200 г. Исследования осуществляли в соответствии с правилами проведения работ с использованием экспериментальных животных (приложение к приказу Минздрава России от 12.08 1997 г. № 755) и требований Европейской конвенции по защите экспериментальных животных (Страсбург, 1986 г.). Модель метаболического синдрома воспроизводилась в течение 60 дней с применением высококалорийной диеты с избыточным потреблением насыщенных жиров и углеводов (добавление 20% маргарина к стандартному корму и 20% раствора фруктозы в качестве питья) [2]. Крысы были разделены на 3 группы: 1-я группа (опытная). Крысы получали питьевую сульфатную МВ в сочетании с ЭМИ СВЧ на фоне применения высококалорийной диеты; 2-я группа (контроль). Крысы получали только высококалорийную диету; 3-я группа (интактная) – крысы без каких-либо воздействий.

Питьевую сульфатную МВ (концентрация сульфат-ионов – 1,6 г/л, минерализация – 3,6 г/л) начинали вводить на 8 день от начала диеты, внутривенно, 1 раз в день по 3 мл через иглу с оливой на конце в течение 24 дней. Через 7 дней после окончания курса поения МВ начинали проводить курс из 12 процедур низкоинтенсивного ЭМИ СВЧ от аппарата «Акватон -2» (плотность потока мощности менее 1 мВт/см², частота около 1000 МГц), ежедневно, по 2 минуты на поясничную область (зона проекции надпочечников). Животных декапитировали на следующий день после окончания процедур.

Методы исследования: биохимические – перекисное окисление липидов (ПОЛ) определяли по реакции малонового диальдегида (МДА); для исследования антиоксидантной активности (АОА) использовали модельную систему в виде суспензии липопротеидов желтка куриного яйца, содержание нуклеиновых кислот (РНК и ДНК) определяли двуволновым спектрофотометрическим методом в модификации; содержание белка – биуретовым методом [8]; светооптические – обзорные (гемаксимин и эозин), морфометрические – подсчет 100 извитых семенных канальцев (ИСК) с различным числом генераций половых клеток (от 4 до 0) и клеток Сертоли. Для электронно-микроскопических исследований кусочки семенника фиксировали в 2,5% растворе глутаральдегида, постфиксировали в 1% растворе OsO₄, после обезвоживания заключали в смесь эпон-аралдит. Исследование образцов проводили с помощью электронного микроскопа «Carl Zeiss STM Nano Technology System Division». Достоверность различий оценивали с помощью t-критерия Стьюдента.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Масса животных опытной группы по сравнению с контролем практически не изменялась (снижение на 3,7%); масса семенников достоверно уменьшалась на 7,9% (p<0,05); масса органов иммуногенеза проявляла тенденцию к увеличению: масса тимуса повышалась на 7,9%, а масса селезенки на 21,2%; масса надпочечников, которые подвергались воздействию ЭМИ СВЧ, возросла на 7,8%.

В семенниках крыс контрольной группы, которые получали высококалорийную диету, развивался комплекс различных структурно-функциональных нарушений. В частности, снижалось число ИСК с 4-я генерациями половых клеток (на 14,6%, p<0,05) и повышалось число ИСК с 3-мя генерациями (на 31,0%, p<0,05). Эти изменения в основном были связаны с замедлением (частичном блокировании) процессов дифференцировки половых клеток. Местами выявлялись дистрофические и некробиотические процессы в сперматогенном эпителии и клетках Сертоли, снижался индекс сперматогенеза. Метаболические нарушения проявлялись в усилении ПОЛ (на 48,3%, p<0,01) и в ослаблении антиоксидантной активности (на 47,1%, p<0,01), что приводило почти к 3-х кратному увеличению окислительного потенциала (ОП=ПОЛ/АОА, p<0,01). Подавлялись также белоксинтезирующие процессы: содержание РНК уменьшалось на 23,7% (p<0,01), ДНК – на 20,7% (p<0,01) и общего белка на 19,5%. Указанные нарушения в семенниках крыс свидетельствовали о развитии выраженных дезадаптационных расстройств и снижении резервных возможностей клеток этого органа.

При сочетанном действии питьевой МВ и ЭМИ СВЧ выявлен целый ряд особенностей в развитии метаболических, светооптических и ультраструктурных сдвигов. Среди метаболических изменений характерным являлось достоверное повышение АОА (на 72,4%, p<0,01) по сравнению с контролем, которое происходило на фоне повышения ПОЛ (на 16,9%, p<0,01) (табл. 1, рис. 1). Важно отметить, что эти сдвиги, в отличие от контроля, вызывали отчетливое снижение окислительного потенциала (ОП=ПОЛ/АОА, p<0,01) (таблица 1). Следовательно, наблюдаемый факт смещения равновесия в сторону интенсификации АОА способствовал восстановлению и укреплению антиоксидантного потенциала (резерва) и повышению уровня защиты сперматогенных клеток. Отмечалась также активация белоксинтезирующих процессов: содержание РНК достоверно увеличивалось на 13,4%, p<0,01, а содержание ДНК и общего белка повышалось в виде выраженной тенденции (соответственно на 8,8% и на 12,1%) (табл. 1, рис. 2). Выявленные сдвиги в виде активации белкового синтеза, а также усиление антиоксидантной активности представляет собой адаптационно-защитные реакции на сочетанное действие лечебных факторов, которые повышали устойчивость клеток семенников в условиях развития метаболического синдрома.

Таблица 1. Действие МВ +ЭМИ СВЧ на метаболические процессы в семенниках крыс при метаболическом синдроме на фоне высококалорийной диеты

Table 1. The effect of MW + EMI microwave on metabolic processes in the testicles of rats with metabolic syndrome on the background of a high-calorie diet

Группы животных / Animal groups	МДА, мк моль / УЕАН, micromole	АОА %	ОП= ПОЛ/АОА OP=POL / AOA	РНК мкг/мл / RNAmcg / MI	ДНК мкг/мл / DNA mcg / MI	Общий белок мкг/мл / Total protein mg/ml
Интакт / Intact	6,86±0,42	36,4 ± 4,59	0,19 ± 0,04	8,23±0,13	8,07±0,19	3,48±0,08
Контроль / Control	10,17±0,4 ⁺	19,26 ± 2,04 ⁺	0,54 ± 0,05 ⁺	6,28± 0,21 ⁺	6,4±0,14 ⁺	2,8±0,29
МВ+ЭМИ / СВЧ MV+micro wave EMR	11,89±0,43 [*]	33,21 ± 1,06 [*]	0,36 ± 0,014 [*]	7,12±0,14 [*]	6,96±0,22	3,14±0,35

Примечание: ⁺- p<0,01 по сравнению с интактной группой; ^{*}- p<0,01 по сравнению с контрольной группой

Note: ⁺- p<0.01 compared to the intact group; ^{*}- p<0.01 compared to the control group

КОРОЛЕВ Ю.Н. И ДР. | ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

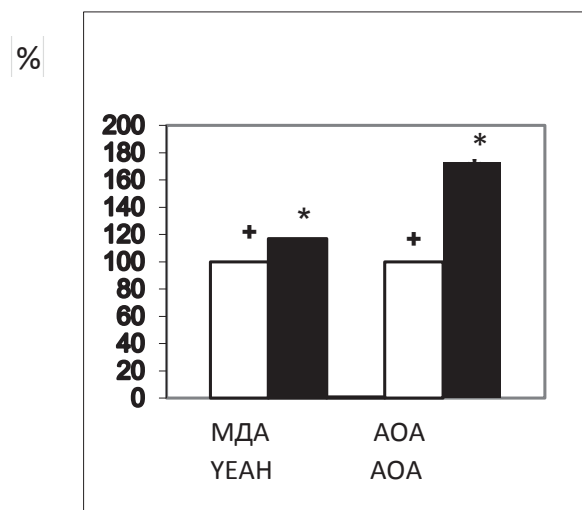


Рис. 1. Изменение уровня МДА и АОА в семенниках крыс при действии МВ + ЭМИ СВЧ в условиях развития метаболического синдрома

Fig. 1. Changes in the level of MDA and AOA in the testes of rats under the action of MW + EMI microwave in the development of metabolic syndrome

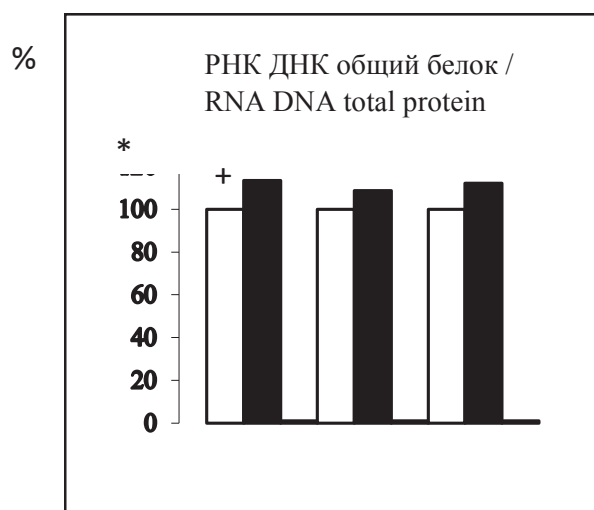


Рис. 2. Изменение количества нуклеиновых кислот и общего белка в семенниках крыс при действии МВ + ЭМИ СВЧ в условиях развития метаболического синдрома

Fig. 2. Changes in the amount of nucleic acids and total protein in the testes of rats under the action of MW + EMI microwave in the development of metabolic syndrome

Примечание: светлые столбики – контроль, темные – МВ + ЭМИ СВЧ. + p <0,01 по сравнению с интактной группой. * p<0,01 по сравнению с контрольной группой

Note: the light bars are control, the dark bars are MW + EMI microwave; + p<0.01 compared to the intact group; * p<0.01 compared to the control group

Среди светооптических изменений при использовании МВ+ЭМИ СВЧ отмечалось увеличение числа ИСК с 4-я генерациями половых клеток (на 21,0%) и уменьшение ИСК с 3-я генерациями (на 29,3%), что свидетельствовало об улучшении процессов дифференцировки половых клеток в направлении «сперматиды-сперматозоиды». Эти сдвиги приводили к повышению индекса сперматогенеза. Процессы клеточной регенерации проявлялись также в увеличении числа клеток Сертоли (на 18,8%, p<0,05) (табл. 2), которые осуществляют

контроль за состоянием процессов сперматогенеза и сохранением функции клеток семенных канальцев. Увеличение численности клеток Сертоли при сочетании действия факторов может указывать на усиление их регуляторной роли в поддержании процессов сперматогенеза в условиях развития метаболического синдрома.

Таблица 2. Действие МВ+ ЭМИ СВЧ на морфометрические показатели семенников крыс при метаболическом синдроме на фоне высококалорийной диеты**Table 2.** The effect of MW + EMI microwave on the morphometric parameters of the testicles of rats with metabolic syndrome on the background of a high-calorie diet

Группы животных / Animal groups	ИСК %/ CLAIM %		Индекс сперматогенеза / Index of spermatogenesis	Количество клеток Сертоли (n) / Number of Sertoli cells (n)
	4 генерации половых клеток / 4 generation of germ cells	3 генерации половых клеток / 3 generation of germ cells		
Интакт / Intact	68,7±3,19	31,3±3,19	3,69±0,03	6,43 0,21
Контроль / Control	58,7±2,1 ⁺	41,0±2,1 ⁺	3,59±0,02 ⁺	7,3± 0,38
МВ+ЭМИ СВЧ / MV+EMI microwave	71,0±5,04	29,0±5,04	3,71±0,05	8,67±0,71 [*]

Примечание: ⁺ $p < 0,05$ по сравнению с интактной группой, ^{*} $p < 0,05$ по сравнению с контрольной группой
Note: ⁺ $p < 0.05$ compared to the intact group; ^{*} $p < 0.05$ compared to the control group

На ультраструктурном уровне под влиянием МВ+ЭМИ СВЧ в клетках Сертоли часто обнаруживались изменения со стороны различных органелл, при этом характер и степень этих сдвигов значительно варьировали. Как и в контроле, наиболее частым изменениям подвергалась структура эндоплазматической сети в виде укорочения мембран и расширения просветов. Вместе с тем обнаруживались также клетки, в которых выявлялись процессы активации белкового синтеза, в частности, в виде скопления рибосом и полисом, что является характерным для развития процессов внутриклеточной регенерации.

Содержание митохондрий обычно было высоким, но при этом они становились более мелкими, крупные по своим размерам встречались значительно реже. В некоторых клетках определялись делящиеся и молодые митохондрии. Наряду с обычными (нормальными) митохондриями выявлялись также деструктивно измененные формы с просветленным матриксом и сниженным числом крист, но встречались они реже по сравнению с более высоким их содержанием в контроле. Активизировалась лизосомальная система в виде увеличения числа первичных лизосом и появления фаголизосом, которые отражали усиление процессов фагоцитоза в клетках Сертоли. При этом нередко встречались весьма крупные фаголизосомы (в количестве 2, 3), которые содержали в своем составе клеточный детрит с остатками мембран на разных стадиях их переваривания (лизирования). Тем самым осуществлялась реакция очищения сперматогенного эпителия от некробиотически измененных половых клеток. Кроме того, в клетках Сертоли выявлялись иногда процессы аутофагии с образованием аутофагосом. В отличие от фаголизосом они состояли из собственных структур самих клеток Сертоли, подвергшихся процессам деструкции с последующим удалением аутофагоцитированного материала. Следует отметить, что наблюдаемая активация аутофагии может являться одним из механизмов адаптации в обеспечении жизнеспособности клеток Сертоли и сперматогенного эпителия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, сочетанное действие питьевой сульфатной МВ и низкоинтенсивного ЭМИ СВЧ способствовало усилению ряда адаптационно-защитных реакций в семенниках крыс в условиях развития метаболического синдрома. В основном они проявлялись в активации антиоксидантной защиты и белкового синтеза, улучшении процессов дифференцировки сперматогенных клеток с увеличением их числа, усилении клеточной и внутриклеточной регенерации. Эти сдвиги являлись свидетельством благоприятного влияния использованных лечебных средств (МВ+ЭМИ СВЧ) в их противодействии (противостоянии) патогенному фактору, каким является в данном эксперименте высококалорийная диета. Очевидно, что реализация выявленных эффектов в основном осуществлялась через общие (системные) нейро-эндокринные и местные механизмы регуляции. Взаимодействие этих механизмов на разных уровнях организации приводило к усилению развития процессов адаптационного характера и повышению устойчивости клеток семенников к патогенному воздействию. С учетом ранее проведенных исследований [8] можно предположить, что наряду с эффективным действием ЭМИ СВЧ существенную роль в формировании этих процессов сыграла питьевая МВ, которая за счет своего детоксицирующего, а также антиоксидантного действия способствовала профилактической активации адаптационно-защитных реакций и ослаблению патологических процессов на раннем этапе развития метаболического синдрома.

На основании полученных данных можно сделать вывод о целесообразности сочетанного применения природного и искусственного факторов – питьевой МВ и низкоинтенсивного ЭМИ СВЧ в условиях данной патологии. Такой подход может быть перспективным в разработке новых способов усиления адаптационно-защитных и компенсаторно-восстановительных процессов в органах репродуктивной системы при метаболическом синдроме.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО**Информация об авторах:**

Королев Юрий Николаевич, доктор медицинских наук, профессор, главный научный сотрудник отдела изучения механизмов действия физических факторов, Национальный медицинский исследовательский центр реабилитации и курортологии Минздрава России.

E-mail: korolev.yur@yandex.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-5530-1538>

Никулина Людмила Анатольевна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела изучения механизмов действия физических факторов, Национальный медицинский исследовательский центр реабилитации и курортологии Минздрава России.

E-mail: nikulinaliudmila2013@yandex.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-2200-868X>

Михайлик Любовь Васильевна, научный сотрудник отдела изучения механизмов действия физических факторов, Национальный медицинский исследовательский центр реабилитации и курортологии Минздрава России.

E-mail: mihaalic2910@icloid.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-9717-4749>

Вклад авторов:

Все авторы подтверждают соответствие своего авторства, согласно международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределён следующим образом:

Королев Ю.Н. – концепция и дизайн исследования, написание текста статьи, редактирование;

Никулина Л.А. – сбор и обработка материала, статистическая обработка данных;

Михайлик Л.В. – сбор и обработка материала, статистическая обработка данных.

Источник финансирования:

Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов:

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

Этическое утверждение:

Исследования осуществляли в соответствии с правилами проведения работ с использованием экспериментальных животных (приложение к приказу Минздрава России от 12.08.1997 г. № 755) и требований Европейской конвенции по защите экспериментальных животных (Страсбург, 1986 г.).

ADDITIONAL INFORMATION**Information about the authors:**

Yuri N. Korolev, Dr. Sci. (Med.), Professor, Chief Researcher of the Department for Studying the Mechanisms of Action of Physical Factors, National Medical Research Center of Rehabilitation and Balneology.

E-mail: korolev.yur@yandex.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-5530-1538>

Lyudmila A. Nikulina, Cand. Sci (Med), Senior Researcher of the Department for Studying the Mechanisms of Action of Physical Factors, National Medical Research Center of Rehabilitation and Balneology.

E-mail: nikulinaliudmila2013@yandex.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-2200-868X>

Lyubov V. Mikhailik, Researcher of the Department for Studying the Mechanisms of Action of Physical Factors, National Medical Research Center of Rehabilitation and Balneology.

E-mail: mihaalic2910@icloid.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-9717-4749>

Author's contribution:

All authors confirm their authorship according to the ICMJE criteria (all authors contributed significantly to the conception, study design and preparation of the article, read and approved the final version before publication).

Special contribution:

Korolev Yu.N. – the concept and design of the study, writing the text of the article, editing;

Nikulina L.A. – collection and processing of material, statistical data processing;

Mikhailik L.V. – collection and processing of material, statistical data processing.

Source of funding:

This study was not supported by any external sources of funding.

Disclosure:

The authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Ethics Approval:

Studies were performed in accordance with the rules of work with experimental animals (Appendix to Order No. 755 of the Ministry of Health of the Russian Federation dated 12.08.1997) and the requirements of the European Convention on the Protection of Experimental Animals (Strasbourg, 1986).

Consent for Publication:

Not applicable.

Список литературы / References

1. Ройтберг Г.Е. Метаболический синдром. Москва. МЕД пресс-информ. 2007: 224 с. [Rojtberg G.E. Metabolic syndrome. Moscow. MED press-inform. 2007: 224 p. (In Russ.)]
2. Lemieux I., Despers J.P. Metabolic Syndrome: Past, Present and Future. *Nutrients*. 2020; 12(11): 3501. <https://doi.org/10.3390/nu12113501>
3. Leisegang K., Sengupta P., Agarwal A., Henkel R. Obesity and male infertility: Mechanisms and management. *Andrologia*. 2021; 53(1): e13617. <https://doi.org/10.1111/and.13617>
4. Cohen D.J., Giaccagli M.H., Herzfeld J.D., Gonzalez L.N., Cuasnicu P.S., Da Ros V.G. Metabolic syndrome and male fertility disorders: Is there a causal link? *Reviews in Endocrine and Metabolic Disorders*. 2021; 22(4): 1057-1071. <https://doi.org/10.1007/s11154-021-09659-9>
5. Martins A.D., Majzoub A., Agawal A. Metabolic syndrome and male fertility. *The World Journal of Men's Health*. 2019; 37(2): 113-127. <https://doi.org/10.5534/wjmh.180055>
6. Lotti F., Marchiani S., Corona G., Maggi M. Metabolic syndrome and reproduction. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021; 22(4): 1988. <https://doi.org/10.3390/ijms22041988>
7. Кирпатовский В.И., Мудрая И.С., Греков Е.А., Кабанова И.В., Голованов С.А., Дрожжева В.В., Надточий О.Н. Влияние экспериментально вызванного метаболического синдрома на функциональное состояние мочевого пузыря у крыс. Экспериментальная и клиническая урология. 2013; (1): 8-13. [Kirpatovskiy V.I., Mudraya I.S., Grekov E.A., Kabanova I.V., Golovanov S.A., Drojzheva V.V., Nadtochiy O.N. Influence of the experimental metabolic syndrome on the function of the urinary bladder in rats. *Experimental and Clinical Urology*. 2013; (1): 8-13 (In Russ.)]
8. Королев Ю.Н., Бобровницкий И.П., Гениатулина М. С. Михайлик Л.В., Никулина Л.А., Бобкова А.С., Яковлев М.Ю. Сочетанное действие питьевой минеральной воды и низкоинтенсивного электромагнитного излучения в условиях иммобилизационного стресса (экспериментальное исследование). Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. 2015; 92(6): 37-41. <https://doi.org/10.17116/kurort2015637-41> [Korolev Yu.N., Bobrovnikskiy I.P., Geniatulina M.S., Mikhailik L.V., Nikulina L.A., Bobkova A.S., Yakovlev M.Yu. The combined action of drinking mineral water and low-intensity electromagnetic radiation under the immobilization stress conditions (an experimental study). *Voprosy kurortologii, fizioterapii, i lechebnoi fizicheskoi kultury*. 2015; 92(6): 37-41. <https://doi.org/10.17116/kurort2015637-41> (In Russ.)]
9. Королев Ю.Н., Никулина Л.А., Михайлик Л.В. Профилактика пострадационных нарушений в семенниках крыс при применении магнитного поля. Вестник восстановительной медицины. 2021; 20 (2): 104-108. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2021-20-2-104-108> [Korolev Y.N., Nikulina L.A., Mikhailik L.V. Prevention of Postradiation Disorders in the Testes of Rats with the use of Magnetic Field. *Bulletin of Rehabilitation Medicine*. 2021; 20(2):104-108. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2021-20-2-104-108> (In Russ.)]
10. Королев Ю.Н., Михайлик Л.В., Никулина Л.А. Влияние низкоинтенсивного электромагнитного излучения на структурно-метаболические процессы у здоровых крыс. Вестник восстановительной медицины. 2019; 94 (6): 60-62. [Korolev Y.N., Mikhailik L.V., Nikulina L.A. Effect of low-intensity electromagnetic radiation on structural and metabolic processes in healthy rats. *Bulletin of Rehabilitation Medicine*. 2019; 94(6): 60-62 (In Russ.)]
11. Макарова М.Н., Макаров В.Г. Диет-индуцированные модели метаболических нарушений. Экспериментальный метаболический синдром. Лабораторные животные для научных исследований. 2018; (1): 1-19. <https://doi.org/10.29296/2618723X-2018-01-08> [Makarova M.N., Makarov V.G. Diet-Induced Models of Metabolic Disorders. Experimental Metabolic Syndrome. *Laboratory Animals for Science*. 2018; (1): 1-19. <https://doi.org/10.29296/2618723X-2018-01-08> (In Russ.)]
12. Pan G., Kong L.D. High fructose diet-induced metabolic syndrome. Pathophysiological mechanism and treatment by traditional Chinese medicine. *Pharmacological Research*. 2018; (130): 438-450. <https://doi.org/10.1016/j.phrs.2018.02.020>
13. Leonardi B.F., Gosmann G., Zimmer A.R. Modeling Diet-Induced Metabolic Syndrome in Rodents. *Molecular Nutrition Food Reseach*. 2020; 64(22): e2000249. <https://doi.org/10.1002/mnfr.202000249>
14. Moreno-Fernandes S., Garees-Rimon M., Vera G., Astier J., Landrier J.F., Miguel M. High Fat/High Glucose Diet Induces Metabolic Syndrome in an Experimental Rat Model. *Nutrients*. 2018; 10 (10): 1502. <https://doi.org/10.3390/nu10101502>
15. El-Mehi A.E., Faried M.A. Effect of high-fructose diet-induced metabolic syndrome on the pituitary-gonadal axis from adolescence through adulthood in male albino rats and the possible protective role of ginger extract. A biochemical, histological and immunohistochemical study. *Folia Morphologica*. 2020; 79(4): 690-708. <https://doi.org/10.5603/FM.a2019.0139>
16. Aydin S., Aksoy A., Kalayci M., Yilmaz M., Kuloglu T., Citil C., Catac Z. Today's and yesterday's of pathophysiology: Biochemistry of metabolic syndrome and animal models. *Nutrition*. 2014; 30(1): P.1-9. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2013.05.013>

