

Ультраструктурный анализ митохондрий в клетках коры надпочечников крыс при действии электромагнитного излучения и питьевой минеральной воды

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

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

РЕЗЮМЕ

ВВЕДЕНИЕ. Применение различных по своей природе лечебных физических факторов низкоинтенсивного электромагнитного излучения сверхвысокой частоты (ЭМИ СВЧ) и питьевой сульфатной минеральной воды (МВ) вызывает усиление процессов регенерации внутриклеточных ультраструктур, в том числе митохондрий. Вместе с тем механизмы развития этих адаптационных реакций остаются еще мало исследованными. Дальнейшее изучение митохондрий при действии ЭМИ СВЧ и питьевой сульфатной МВ целесообразно провести в клетках пучковой зоны надпочечников — адренокортикотоцитах (АКЦ), играющих важную роль в регуляции процессов адаптации в организме.

ЦЕЛЬ. Изучение характера и особенностей развития адаптационных ультраструктурных изменений митохондрий АКЦ пучковой зоны надпочечников крыс при действии ЭМИ СВЧ и питьевой сульфатной МВ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Эксперименты проведены на 23 белых нелинейных крысах-самцах. Все животные были разделены на следующие группы: 1-я опытная группа — действие ЭМИ СВЧ; контроль — ложные процедуры (без включения аппарата), 2-я опытная группа — действие питьевой сульфатной МВ; контроль — водопроводная вода. Использовали также группу интактных животных. Курс ЭМИ СВЧ (10 процедур) проводили на поясничную область (зона проекции надпочечников) с помощью аппарата «Акватон-2» (площадь потока мощности — 1 мкВт/см², частота — около 1000 мГц, время воздействия — 2 минуты). Питьевую сульфатную магниевую-кальциевую-натриевую МВ (концентрация сульфат-ионов — 1,93 г/л, минерализация — 3,05 г/л) вводили внутривенно по 3 мл, всего 16 процедур. Объект исследования: АКЦ пучковой зоны надпочечников. Методы исследования: трансмиссионная электронная микроскопия, морфометрия.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Действие ЭМИ СВЧ в используемом режиме из двух форм регенерации стимулировало только одну — внутриорганогенную, что приводило к отчетливому укрупнению митохондрий и повышению их биоэнергетического потенциала. Развитие дисбаланса в процессах регенерации, связанного с уменьшением численности митохондрий и, соответственно, с подавлением органогенной регенерации, вызывало определенное стрессорное напряжение в развитии адаптационных реакций. При применении питьевой сульфатной МВ в митохондриях отмечалось более сбалансированное развитие обеих форм регенерации, при этом возрастала как масса митохондрий, так и их биоэнергетический потенциал.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Применение ЭМИ СВЧ и питьевой сульфатной МВ вызывало в митохондриях АКЦ разное по интенсивности усиление регенераторно-гиперпластических процессов и повышение их биоэнергетического потенциала. Результаты исследования позволяют понять характерные особенности в механизмах действия ЭМИ СВЧ и питьевой сульфатной МВ на процессы регенерации и биоэнергетической адаптации в митохондриях АКЦ, которые следует учитывать при разработке новых способов профилактики и реабилитации в клинике.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: митохондрии, органогенная и внутриорганогенная формы регенерации, адренокортикотоциты, электромагнитное излучение, питьевая сульфатная минеральная вода, эксперимент

Для цитирования / For citation: Королев Ю.Н., Никулина Л.А., Михайлик Л.В. Ультраструктурный анализ митохондрий в клетках коры надпочечников крыс при действии электромагнитного излучения и питьевой минеральной воды. Вестник восстановительной медицины. 2025; 24(4):89–95. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2025-24-4-89-95> [Korolev Yu.N., Nikulina L.A., Michailik L.V. Ultrastructural Analysis of Mitochondria in Rat Adrenal Cortex Cells Exposed to Electromagnetic Radiation and Drinking Mineral Water. Bulletin of Rehabilitation Medicine. 2025; 24(4):89–95. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2025-24-4-89-95> (In Russ.).]

* Для корреспонденции: Королев Юрий Николаевич, E-mail: korolev.yur@yandex.ru, korolevyn@nmicrk.ru

Статья получена: 27.02.2025
Статья принята к печати: 07.05.2025
Статья опубликована: 16.08.2025

Ultrastructural Analysis of Mitochondria in Rat Adrenal Cortex Cells Exposed to Electromagnetic Radiation and Drinking Mineral Water

 Yury N. Korolev*,  Liudmila A. Nikulina,  Lyubov V. Michailik

National Medical Research Center for Rehabilitation and Balneology, Moscow, Russia

ABSTRACT

INTRODUCTION. The application of therapeutic physical factors, different in their nature, such as low-intensity ultrahigh frequency electromagnetic radiation (UHF EMR) and drinking sulphated mineral water (MW), causes the increase of regeneration processes of intracellular ultrastructures, including mitochondria. Meanwhile, the mechanisms of development of these adaptation reactions remain understudied. Further study of mitochondria exposed to microwave EMR and drinking sulfate MW should be carried out in cells of the fascicular zone of the adrenal glands — adrenocorticocytes (ACC), which play an important role in regulating adaptation processes in the body.

ARM. To study the nature and development features of adaptive ultrastructural changes in the mitochondria of the ACC of the fascicular zone of the adrenal glands of rats that are exposed to microwave EMR and drinking sulfate MW.

MATERIALS AND METHODS. Experiments were conducted on 23 white nonlinear male rats. All animals were divided into groups: the 1st experimental group — the effect of microwave EMR; control — false procedures (without turning on the device). The 2nd experimental group — the effect of drinking sulfate MW; control — tap water. A group of intact animals was also used. A course of microwave EMR (10 procedures) was performed on the lumbar region (the area of projection of the adrenal glands) using the Aquaton — 2 devices (power flow area of 1 MW/cm², frequency of about 1000 MHz, exposure time 2 minute). Drinking magnesium-calcium-sodium sulfate MV (sulfate ion concentration — 1.93 g/l, mineralization — 3.05 g/l) was administered intragastrically in 3 ml, for a total of 16 procedures. The object of the study: ACC of the fascicular zone of the adrenal glands. Research methods: transmission electron microscopy, morphometry.

RESULTS AND DISCUSSION. The effect of microwave EMR in the used mode stimulated only one of the two forms of regeneration, the intraorganoid one, which led to a distinct enlargement of mitochondria and an increase in their bioenergetic potential. The development of an imbalance in regeneration processes associated with a decrease in the number of mitochondria and, consequently, with the suppression of organoid regeneration, caused a certain stress in the development of adaptive reactions. When drinking sulfate MW was used in mitochondria, a more balanced development of both forms of regeneration was observed, with an increase in both mitochondrial mass and their bioenergetic potential.

CONCLUSION. The use of microwave EMR and drinking sulfate MW caused increased regenerative-hyperplastic processes in ACC mitochondria of varying intensity and increased their bioenergetic potential. The results of the study make it possible to understand the characteristic features in the mechanisms of action of microwave EMR and drinking sulfate MW on the processes of regeneration and bioenergetic adaptation in ACC mitochondria, which should be taken into account when developing new methods of prevention and rehabilitation in the clinic.

KEYWORDS: mitochondria, organoid and intraorganoid forms of regeneration, adrenocorticocytes, electromagnetic radiation, drinking sulfate mineral water, experiment

For citation: Korolev Yu.N., Nikulina L.A., Michailik L.V. Ultrastructural Analysis of Mitochondria in Rat Adrenal Cortex Cells Exposed to Electromagnetic Radiation and Drinking Mineral Water. *Bulletin of Rehabilitation Medicine*. 2025; 24(4):89–95. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2025-24-4-89-95> (In Russ.).

***For correspondence:** Yury N. Korolev, E-mail: korolev.yur@yandex.ru, korolevyn@nmicrk.ru

Received: 27.02.2025

Accepted: 07.05.2025

Published: 16.08.2025

ВВЕДЕНИЕ

Митохондрии являются важной органеллой в изучении механизма действия лечебных физических факторов. По современным представлениям, кроме своей основной функции (выработка энергии), митохондрии участвуют в зависимости от типа клеток в различных структурно-метаболических реакциях, в частности, в процессах синтеза и секреции, продукции активных форм кислорода, регуляции апоптоза, клеточном гомеостазе [1–4]. Показано, что митохондрии вырабатывают различные специфические белки, которые способствуют как слиянию самих митохондрий (в частности, в условиях дефицита энергии и при развитии стресса), так и наоборот, стимулируют их деление [5–8]. Проводятся различные исследования по

целевому воздействию на митохондрии при различной патологии и старении организма с применением митохондриально-направленных антиоксидантов [2, 9, 10]. Разработка такого лечебного подхода, где митохондрии становятся «терапевтической мишенью», продолжает активно развиваться в разных аспектах [2, 11]. В свете представленных данных перспективным является изучение митохондрий при действии лечебных физических факторов различной природы, в частности, низкоинтенсивного электромагнитного излучения (ЭМИ) сверхвысокой частоты (СВЧ) и питьевой сульфатной минеральной воды (МВ), обладающих антиоксидантным и мембраностабилизирующим эффектами, которые лежат в основе их лечебно-профилактического и реабилитационного действия. При

этом были выявлены активация митохондриальных регенераторно-гиперпластических реакций, увеличение массы митохондрий и их энергообеспечение [12–14]. Дальнейшее изучение механизмов адаптации митохондрий целесообразно провести в клетках пучковой зоны надпочечников — адренкортикоцитах (АКЦ), что связано с определенной спецификой в их структуре и с их функцией. В основном это проявляется в более крупных размерах как самих клеток, так и их митохондрий, которые выполняют ключевую роль в синтезе глюкокортикоидных гормонов [1, 3, 4, 6].

ЦЕЛЬ

Изучение характера и особенностей развития адаптационных ультраструктурных изменений митохондрий АКЦ пучковой зоны надпочечников крыс при действии ЭМИ СВЧ и питьевой сульфатной МВ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Эксперименты проведены на 23 нелинейных крысах-самцах массой 220–250 г, которые были получены из питомника «Столбовая» ФГБУН «Научный центр биомедицинских технологий Федерального медико-биологического агентства». Исследования осуществляли в соответствии с правилами проведения работ с использованием экспериментальных животных (требования Европейской конвенции по защите экспериментальных животных (Страсбург, 1986)). Методом рандомизации животные были распределены на 5 групп. Животные 1-й опытной группы ($n = 5$) подвергались действию ЭМИ СВЧ; в контрольной группе ($n = 5$) вместо ЭМИ СВЧ животные получали ложные процедуры (аппарат не включали). Животные 2-й опытной группы ($n = 5$) получали питьевую сульфатную магниевую-кальциевую-натриевую МВ (концентрация сульфата — 1,93 г/л, минерализация — 3,05 г/л); в контрольной группе ($n = 5$) вместо сульфатной МВ животные получали водопроводную воду. Использовались также интактные животные ($n = 3$), которые никаким воздействиям не подвергались. Воздействие ЭМИ СВЧ (курс из 10 процедур) проводили на поясничную область (зона проекции надпочечников) с помощью аппарата «Акватон -2» (плотность потока мощности — 1 мкВт/см², частота — около 1000 МГц, время воздействия — 2 минуты). МВ и водопроводную воду вводили крысам внутрижелудочно через иглу с оливой на конце, 1 раз в день по 3 мл в течение 16 дней. Животных выводили из эксперимента путем дислокации шейного отдела позвоночника после окончания курса процедур. Для электронно-микроскопических исследований образцы коры надпочечников фиксировали в 2,5 % растворе глутаральдегида, постфиксировали в 1 % растворе OsO₄. После обезвоживания образцы заключали в смесь эпона и аралдита. Исследования проводили на электронном микроскопе Libra 120 (Германия) с программой Carl Zeis Technology System Division, которая включает математическую обработку внутриклеточных структур. Осуществляли морфометрический анализ митохондрий (число, средняя и суммарная площади). Количественную оценку полученных данных проводили с помощью методов вариационной статистики. Для оценки достоверности различий сравниваемых величин использовали t -критерий Стьюдента. Достоверными считали различия при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В проведенном исследовании различали две формы регенерации митохондрий АКЦ — органоидную (изменение количества митохондрий) и внутриорганодную (изменение размеров митохондрий и числа внутримитохондриальных структур — крист). Установлено, что у животных контрольной группы к действию ЭМИ СВЧ количество митохондрий сохранялось, но при этом происходило снижение их средней площади (на 26,4 %, $p < 0,01$) и числа крист (на 23,1 %, $p < 0,01$) в связи с ослаблением процессов внутриорганодной формы регенерации. Следствием этих изменений являлось уменьшение суммарной площади митохондрий. У животных контрольной группы к действию питьевой МВ, наоборот, отмечалось уменьшение количества самих митохондрий и увеличение их средней площади (на 23,9 %, $p < 0,01$), что было связано со снижением активности органоидной и усилением внутриорганодной форм регенерации. Все эти изменения приводили к снижению суммарной (общей) площади митохондрий и к ослаблению в той или иной мере биоэнергетических ресурсов в АКЦ у животных обеих контрольных групп.

Применение лечебных физических факторов вызвало усиление развития в основном однонаправленных, но разных по интенсивности регенераторно-гиперпластических реакций в митохондриях. В наибольшей степени они проявлялись при действии ЭМИ СВЧ, особенно подвергались изменениям средняя площадь митохондрий (увеличение на 69,8 %, $p < 0,01$) и численность крист (увеличение на 68,6 %, $p < 0,01$) (рис. 1). Эти сдвиги представляли собой процессы гипертрофии митохондрий, развивавшиеся в сочетании с гиперплазией внутримитохондриальных структур — крист. В результате митохондрии становились более крупными и мощными энергетическими структурами. Однако при этом происходило, что важно отметить, снижение общего количества митохондрий (на 28,2 %, $p < 0,01$), которое повлияло и на их суммарную площадь: она возрастала по сравнению с контролем, но не достигала уровня интакта (рис. 1). Такие изменения в соотношении исследуемых показателей митохондрий при действии ЭМИ СВЧ свидетельствовали о выраженном усилении внутриорганодной формы регенерации и подавлении органоидной, что указывало на определенную напряженность в развитии этих адаптационных реакций.

При действии питьевой сульфатной МВ (рис. 2), в отличие от ЭМИ СВЧ, число митохондрий не снижалось, а наоборот, возрастало (на 13,6 %, $p < 0,05$) по сравнению с контролем, что указывало на активацию органоидной формы регенерации митохондрий, которая сочеталась с внутриорганодной. При этом средняя площадь митохондрий практически не изменялась, однако численность крист, как весьма важный показатель внутриорганодной регенерации, проявляла тенденцию к повышению (на 8,4 %). В этих условиях суммарная площадь митохондрий возрастала на 16,1 % ($p < 0,05$) по сравнению с контролем и в виде тенденции превышала уровень интакта. Следовательно, при применении питьевой сульфатной МВ характерным являлось достоверное увеличение числа митохондрий и суммарной их площади по сравнению с контролем, хотя биоэнергетический потенциал этих митохондрий (с учетом более низкой численности крист) был выражен слабее, чем при действии ЭМИ СВЧ.

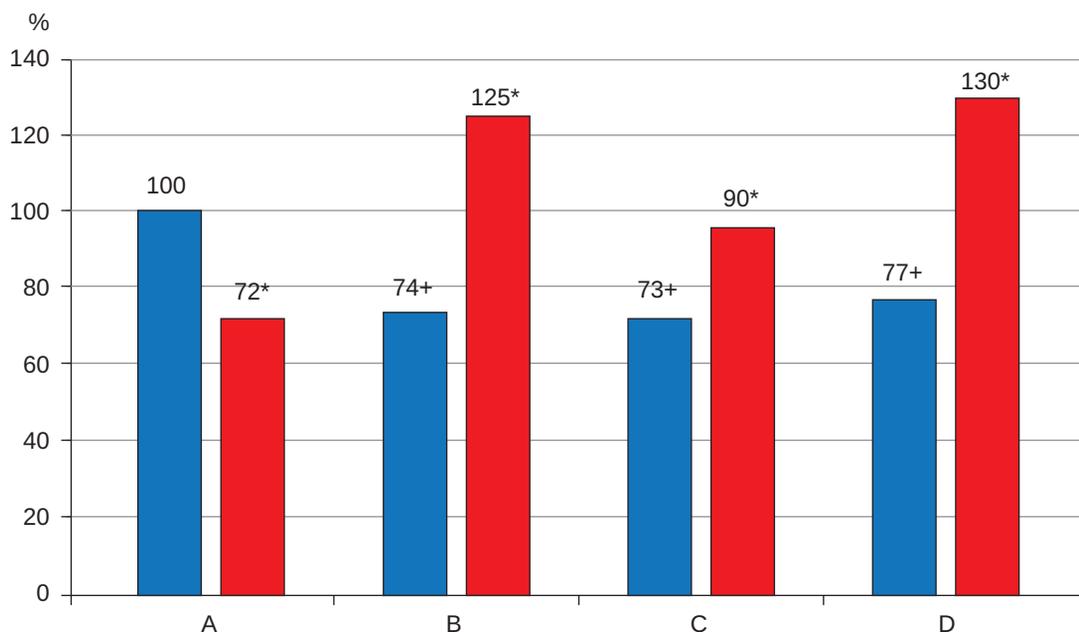


Рис. 1. Ультраструктурная характеристика митохондрий адренокортикоцитов пучковой зоны коры надпочечников при действии электромагнитного излучения сверхвысокой частоты

Fig. 1. Ultrastructural characteristics of mitochondria of adrenocorticocytes of the fascicular zone of the adrenal cortex when exposed to ultrahigh frequency electromagnetic radiation

Примечание: Светлые столбики — контроль; темные — электромагнитное излучение сверхвысокой частоты; А — количество митохондрий; В — средняя площадь митохондрий; С — суммарная площадь митохондрий; D — количество крист. + — $p < 0,01$ по сравнению с интактной группой, * — $p < 0,01$ по сравнению с контрольной группой.

Note: Light columns are control; dark columns are ultrahigh frequency electromagnetic radiation; A — the number of mitochondria; B — the average area of mitochondria; C — the total area of mitochondria; D — the number of crystals. + — $p < 0.01$ compared to the intact group, * — $p < 0.01$ compared to the control group.

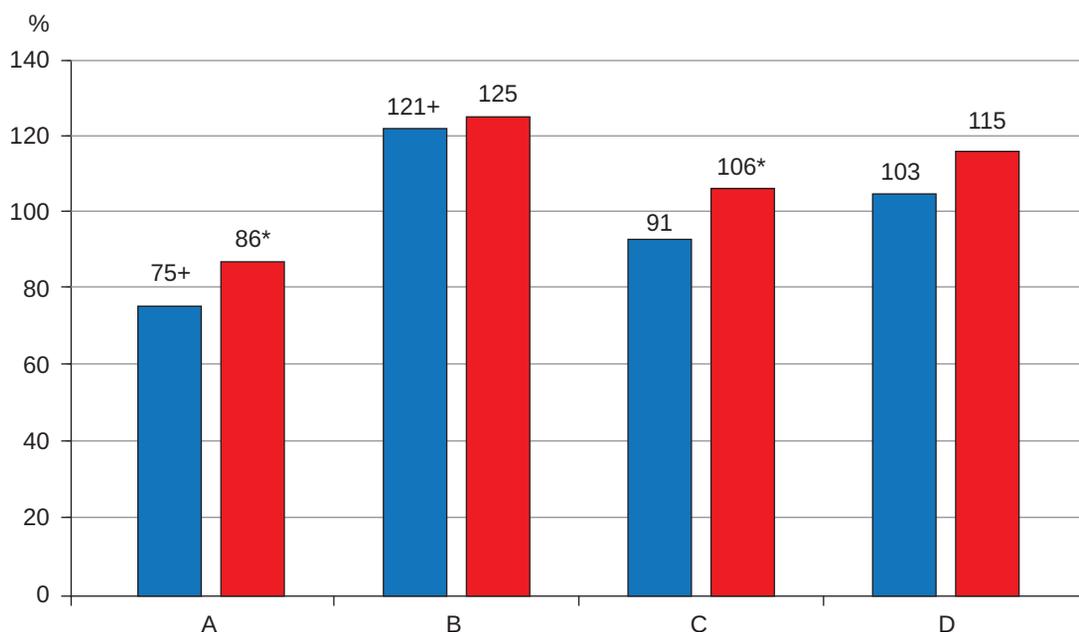


Рис. 2. Ультраструктурная характеристика митохондрий адренокортикоцитов пучковой зоны коры надпочечников при действии сульфатной минеральной воды

Fig. 2. Ultrastructural characteristics of mitochondria of adrenocorticocytes of the fascicular zone of the adrenal cortex under the action of sulfate mineral water

Примечание: Светлые столбики — контроль; темные — сульфатная минеральная вода. А — количество митохондрий; В — средняя площадь митохондрий; С — суммарная площадь митохондрий; D — количество крист. + — $p < 0,01$ по сравнению с интактной группой, * — $p < 0,05$ по сравнению с контрольной группой.

Note: The light bars are control; the dark ones are sulfate mineral water. A — the number of mitochondria; B — the average area of mitochondria; C — the total area of mitochondria; D — the number of crystals. + — $p < 0.01$ compared to the intact group, * — $p < 0.05$ compared to the control group.

Таким образом, применение ЭМИ СВЧ и питьевой сульфатной МВ вызывало усиление адаптационных сдвигов в митохондриях АКЦ, основу которых составляли регенераторно-гиперпластические реакции, проявлявшиеся в двух формах регенерации — органоидной и внутриорганой (внутримитохондриальной). Оказалось, что исследуемые факторы по-разному стимулировали эти формы регенерации: ЭМИ СВЧ — только внутриорганой, питьевая сульфатная МВ — в большей мере органоидную, но в сочетании с внутриорганой. Основной причиной этих различий являлась разная интенсивность воздействия исследуемых факторов на организм.

При применении ЭМИ СВЧ на область надпочечников организм включал ту форму регенерации митохондрий АКЦ, которая была необходима для быстрого реагирования на действующий фактор в связи с выраженным усилением функциональной нагрузки и повышенным потреблением энергии в клетках зоны воздействия. И такой реакцией становилась внутриорганой регенерация, которая увеличивала число структур, производящих аденозинтрифосфат (АТФ), — крист. Однако в связи с тем, что потребность в энергии явно превышала возможность ее производства и не была удовлетворена, включался дополнительный механизм адаптации, связанный со слиянием митохондрий для повышения биоэнергетики [5, 6]. Тем самым организму пришлось в этих условиях «жертвовать» числом митохондрий в обмен на создание укрупненных в результате слияния и образования более мощных митохондрий, что в свою очередь вызывало снижение их суммарной площади (общей массы). При влиянии питьевой сульфатной МВ, когда отсутствовала необходимость в быстром реагировании на действие этого фактора, происходило относительно сбалансированное развитие обеих форм регенерации. В этих условиях митохондрии функционировали на более устойчивом физиологическом уровне, что было связано с достоверным увеличением их численности, суммарной площади и возросшим биоэнергетическим ресурсом.

Выявленные адаптационные перестройки являлись результатом антиоксидантного и мембраностабилизирующего действия ЭМИ СВЧ и МВ как непосредственно на мембранные структуры клеток и их митохондрии, так и на регуляторные системы организма с преимущественным развитием реакций неспецифического харак-

тера. В наибольшей степени эти реакции проявлялись при действии ЭМИ СВЧ (как оказалось, не в полной мере адекватным), при котором увеличивались количественные сдвиги, но терялись качественные (специфические) особенности в ответных реакциях организма, что привело к дисбалансу в развитии форм регенерации.

В условиях действия питьевой сульфатной МВ, напротив, были очевидны и качественные особенности в адаптационных перестройках митохондрий, обусловленные избирательным действием комплекса ионов, макро- и микроэлементов — природных регуляторов метаболических процессов. В этом плане больше известен механизм действия кальция, который способен вмешиваться в митохондриальный метаболизм, регулируя выработку АТФ, а также подвижность митохондрий для обеспечения местного энергоснабжения в клетке [15, 16].

Эти и другие специфические особенности в действии МВ способствовали более широкому развитию адаптационных реакций, которые, по своей совокупности, становились основой для сбалансированного (гармоничного) развития обеих форм регенерации митохондрий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение ЭМИ СВЧ и питьевой сульфатной МВ вызывало в митохондриях АКЦ пучковой зоны надпочечников разное по интенсивности усиление регенераторно-гиперпластических процессов и повышение их биоэнергетического потенциала. Для оптимизации адаптивных процессов при применении ЭМИ СВЧ, имея в виду в основном активацию обеих форм регенерации и повышение митохондриальных ресурсов, следует использовать более адекватные режимы воздействия этого фактора. Результаты исследования позволяют понять характерные особенности в механизмах действия ЭМИ СВЧ и питьевой сульфатной МВ на ультраструктуру митохондрий АКЦ, которые важно учитывать при разработке новых способов профилактики и реабилитации. Необходимо дальнейшее изучение адаптационных изменений митохондрий под влиянием лечебных физических факторов и развитие в целом митохондриального направления исследований в курортологии и физиотерапии (в рамках митохондриальной медицины [17]), что будет способствовать повышению эффективности проводимых лечебно-профилактических и реабилитационных мероприятий.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

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

E-mail: korolev.yur@yandex.ru, korolevyn@nmicrk.ru;

ORCID: <https://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.

ORCID: <https://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.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9717-4749>

Вклад авторов. Все авторы подтверждают свое авторство в соответствии с международными критериями ICMJE (все авторы внесли значительный вклад в концепцию, дизайн исследования и подготовку статьи, прочитали и одобрили окончательный вариант до публикации). Вклад распределен следующим образом: Королев Ю.Н. — научное обоснование, концепция и дизайн, написание текста, проверка и редактирование рукописи; Никулина Л.А. — проведение исследования, анализ данных, статистическая обработка данных; Михайлик Л.В. — проведение исследования, анализ данных, статистическая обработка данных.

Источники финансирования. Данное исследование не было поддержано никакими внешними источниками финансирования.

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

Этическое утверждение. Исследования осуществляли в соответствии с требованиями Европейской конвенции по защите экспериментальных животных (Страсбург, 1986).

Доступ к данным. Данные, подтверждающие выводы этого исследования, можно получить по обоснованному запросу у корреспондирующего автора.

ADDITIONAL INFORMATION

Yury N. Korolyov, D.Sc. (Med.), Professor, Head of the Department the Study the Mechanisms of Action of Physical Factors, National Medical Research Center for Rehabilitation and Balneology.

E-mail: korolev.yur@yandex.ru, korolevyn@nmicr.ru;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5530-1538>

Liudmila A. Nikulina, Ph.D. (Med), Senior Researcher of the Department the Study the Mechanisms of Action of Physical Factors, National Medical Research Center for Rehabilitation and Balneology.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2200-868X>

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9717-4749>

Author Contributions. All authors confirm their authorship according to the international 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 contributions: Korolev Yu.N. — conceptualization, formal analysis, writing — original draft, writing — review & editing; Nikulina L.A. — investigation, formal analysis; Michailik L.V. — investigation, formal analysis.

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

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

Ethics Approval. The research was carried out in accordance with the requirements of the European Convention for the Protection of Vertebrate Animals used for Experimental and other Scientific Purposes (Strasbourg, 1986).

Data Access Statement. The data that support the findings of this study are available on reasonable request from the corresponding author.

Список литературы/References

- Vega-Vasquez T., Langgartner D., Wang J.Y., et al. Mitochondrial morphology in the mouse adrenal cortex: Influence of chronic psychosocial stress. *Psychoneuroendocrinology*. 2024; 160(4): 106683. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2023.106683>
- Caldeira D.A.F., Weiss D.J., Rieken P.R.M., et al. Mitochondria in focus: from function to therapeutic strategies in chronic lung diseases. *Frontiers Immunology*. 2021; 12: 782074. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2021.782074>
- Bassi G., Sidhu S.K., Mishra M. The Expanding Role of Mitochondria, Autophagy and Lipophagy in Steroidogenesis. *Frontiers Immunology*. 2021; 10(8): 1851. <https://doi.org/10.3389/fcels.2021.1851>
- Valero-Ochando J., Canto A., Lopez-Pedrajas R., et al. Role of Gonadal steroid hormones in the eyes: therapeutic implication. *Biomolecules*. 2024; 14(10): 1262. <https://doi.org/10.3390/biom14101262>
- Garci M.M., Paz., Castillo A., et al. New insights into signal transduction pathways in adrenal steroidogenesis: the role of mitochondrial fusion, lipid mediators, and MARC phosphatase. *Frontiers endocrinology*. 2023; 14: 1175677. <https://doi.org/10.3389/fendo.2023.1175677>
- Rong Yu., Lendah U., Nister M., Zhao J. Regulation of mammalian mitochondrial dynamics: opportunities and challenges. *Frontiers Endocrinology* 2020; 11: 374. <https://doi.org/10.3389/fendo.2020.00374>
- Ferry A., Shirihai O. Mitochondrial dynamics: The Intersection of form and Function. *Advance in Experimental Medicine and Biology*. 2012; 748: 13–40. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3573-0_2
- Yule R.J., Van der Blick A.M. Mitochondrial fission, fusion, and stress. *Science*. 2012; 337(6098): 1062–1065. <https://doi.org/10.1126/science.1219855>
- Birch J., Barnes P., Passos J.F. Mitochondria, telomeres, and cell aging: implications for lung aging and disease. *Pharmacology* 2018. 183: 34–49. <https://doi.org/10.1016/j.pharmthera.2017.10.005>
- Бакеева Л.Е. Возраст-зависимые изменения ультраструктуры митохондрий. Действие SkQ1. *Биохимия*. 2015; 8(12): 1843–1850. [Bakeeva L.E. Age-dependent changes in the ultrastructure of mitochondria. SkQ1 action. *Biokhimiya*. 2015; 8(12): 1843–1850 (In Russ.)]
- Франциянц Е.М., Нескубина И.В., Шейко Е.А. Митохондрии трансформированной клетки как мишень противоопухолевого воздействия. *Исследования и практика в медицине*. 2020; 7(2): 92–108. <https://doi.org/10.17709/2409-2231-2020-7-2-9> [Franzyants E.M., Neskubina I.V., Sheiko E.A. Mitochondria of transformed cell as a target of antitumor. *Research and Practical Medicine Journal*. 2020; 7(2): 92–108. <https://doi.org/10.17709/2409-2231-2020-7-2-9> (In Russ.)]
- Королев Ю.Н., Михайлик Л.В., Никулина Л.А. Механизмы действия питьевой сульфатной минеральной воды при первичном профилактическом и лечебном применении в условиях экспериментального стресса: сравнительный анализ. *Вестник восстановительной медицины* 2023; 22(4): 3–10. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2023-22-4-90-95> [Korolev Y.N., Michailik L.V., Nikulina L.A. Drinking Sulphate Mineral Water Action Mechanisms at Primary Preventive and Therapeutic Application under Experimental Stress: a Comparative Analysis. *Bulletin of Rehabilitation Medicine*. 2023; 22(4): 3–10. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2023-22-4-90-95> (In Russ.)]
- Королев Ю.Н., Никулина Л.А., Михайлик Л.В. Влияние низкоинтенсивного электромагнитного излучения на структурно-метаболические процессы у здоровых крыс. *Вестник восстановительной медицины*. 2019; 6 (94): 60–62. [Korolev Yu.N., Nikulina L.A., Michailik L.V. Effect of low-intensity electromagnetic radiation on structural and metabolic processes in healthy rats. *Journal of Restorative Medicine and Rehabilitation*. 2019; 6(94): 60–62 (In Russ.)]
- Королев Ю.Н., Михайлик Л.В., Никулина Л.А. Сочетанное действие питьевой сульфатной минеральной воды и низкоинтенсивного электромагнитного излучения на семенники крыс при метаболическом синдроме. *Вестник восстановительной медицины*. 2022; 21(6): 127–133. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2022-21-6-127-133> [Korolev Yu.N., Michailik 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> (In Russ.)]

15. Glancy B., Balaban R.S. Role of mitochondrial Ca^{2+} the in regulation of cellular energetics. *Biochemistry* 2012; 51: 2959–2573. <https://doi.org/10.1021/bi2018909>
16. Jeyaraju D.V., Cisbani G., Pellegrini L. Calcium regulation of mitochondrial motility and morphology. *Biochimica Biochysica Acta* 2009; 1787(11): 13631373. <https://doi.org/10.1016/j.bbabo.2008.12.005>
17. Царегородцев А.Д., Сухоруков В.С. Митохондриальная медицина — проблемы и задачи. *Российский вестник перинатологии и педиатрии*. 2021; 4(2): 4–13. [Tsaregorodtsev A.D. Sukhorukov V.S. Mitochondrial medicine — problems and tasks. *Russian Bulletin of Perinatology and Pediatrics*. 2021; 4(2): 4–13 (In Russ).].