Вопросы курортологии, физиотерапии
и лечебной физической культуры
2026, Т. 103, № 1, с. 43–50
https://doi.org/10.21320/2309-1355-2026-103-1-43-50

Problems of Balneology, Physiotherapy
and Exercise Therapy
2026, Vol. 103, no. 1, pp. 43–50
https://doi.org/10.21320/2309-1355-2026-103-1-43-50

Механизмы синергизма антиоксидантного эффекта отрицательных аэроионов и сульфидных минеральных вод: экспериментальное контролируемое исследование

К.Г. Репс

Пятигорский государственный научно-исследовательский институт курортологии — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения «Федеральный научно-клинический центр медицинской реабилитации и курортологии Федерального медико-биологического агентства», Пятигорск, Россия

РЕЗЮМЕ

Цель. Анализ эффекта синергизма действия отрицательных аэроионов (ОАИ) и сульфидных минеральных вод на систему антиоксидантной защиты тканей легкого здоровых крыс и крыс с экспериментальной моделью контузионной травмы структур опорно-двигательного аппарата.

Материалы и методы. Контролируемое экспериментальное исследование проведено на 66 крысах-самцах линии Вистар (36 здоровых и 30 с моделью контузионной травмы структур опорно-двигательного аппарата). Животные обеих групп получали курсы бальнеотерапии (с серосодержащей (10 мг/л) минеральной водой (минерализация — 5,3 г/л) Пятигорского источника №2 и искусственной аэронизацией с применением генератора легких аэроионов (ионизатор «Ион-эффект») в концентрации 4×10^4 на $см^3$ (высокоплотное воздействие) как монофакторов, так и их сочетаний. В ткани легких крыс (зона контакта газообразных компонентов факторов) и ткани мышц (зона повреждения при моделировании травмы) определялись уровни малонового диальдегида (МДА) *in vivo* и *in vitro* при индуцированном и спонтанном перекисном окислении липидов (ПОЛ) в гомогенатах тканей. В сыворотке крови крыс определяли методом твердофазного иммуноферментного анализа и видоспецифических реактивов уровень ферментов супероксиддисмутазы и глутатионпероксидазы. Статистическая обработка данных проводилась с использованием критериев непараметрического анализа. Многомерный анализ и визуализация экспериментальных данных выполнены на языке программирования R версии 4.5.0 с помощью пакетов ggplot2 и GGally.

Результаты. Получены данные, свидетельствующие о более выраженном синергетическом эффекте исследуемых факторов на интенсивность ПОЛ в тканях при их сочетанном применении на экспериментальной модели контузионной травмы структур опорно-двигательного аппарата. При применении курса искусственной аэроионизации на здоровых животных получен дозозависимый эффект на уровень ПОЛ в ткани легкого (зона контакта с фактором).

Заключение. Сочетанное применение курсов легких ОАИ и сероводородсодержащих минеральных вод показывает значительно лучшее функционирование антиоксидантной системы в ткани мышц задней конечности в зоне повреждения, о чем свидетельствует более низкий уровень индуцированного ПОЛ относительно контрольной группы.

Ключевые слова: *синергизм, сероводород, минеральные воды, искусственная ионизация, аэроионы, антиоксидантная система, перекисное окисление липидов, контузионная травма, крысы линии Вистар.*

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:
Репс К.Г. — https://orcid.org/0000-0001-8557-3809; eLibrary SPIN: 3825-8857
Автор, ответственный за переписку: Репс К.Г. — e-mail: kirillreps@gmail.com

КАК ЦИТИРОВАТЬ:
Репс К.Г. Механизмы синергизма антиоксидантного эффекта отрицательных аэроионов и сульфидных минеральных вод: экспериментальное контролируемое исследование. *Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры.* 2026; 103(1):43–50. https://doi.org/10.21320/2309-1355-2026-103-1-43-50

© Репс К.Г., 2026

Mechanisms of synergismic antioxidant effect of negative aeroions and sulfide mineral waters: experimental controlled study

K.G. Reps

Pyatigorsk State Research Institute of Balneology — branch of the Federal Scientific and Clinical Center for Medical Rehabilitation and Balneology of the Federal Medical and Biological Agency, Pyatigorsk, Russia

ABSTRACT

Objective. The purpose of the study was to analyze the synergistic effect of negative air ions and sulfide mineral waters on the antioxidant defense system of lung tissue in healthy rats and in an experimental model of contusion injury of the musculoskeletal system.

Materials and methods. A controlled experimental study was conducted on 66 male Wistar rats (36 healthy and 30 with a modeled contusion injury to the musculoskeletal structures), which underwent courses of balneotherapy (using sulfur-containing (10 mg/L) mineral water (mineralization — 5.3 g/L) from Pyatigorsk source No 2 and artificial aeroionization using a light aeroion generator ("Ion-effect" ionizer) at a concentration of 4×10^4 per cm^3 (high-density exposure) both as single factors (monofactors) and in their combinations.

In rat lung tissue (the contact zone of gaseous components of factors) and muscle tissue (the injury zone during injury modeling), malondialdehyde levels were determined *in vivo* and *in vitro* during induced and spontaneous lipid peroxidation in tissue homogenates. The level of superoxide dismutase and glutathione peroxidase enzymes in rat blood serum was determined by solid-phase enzyme immunoassay and species-specific reagents. Statistical data processing was carried out using nonparametric analysis criteria. Multivariate analysis and visualization of experimental data were performed using the R programming language version 4.5.0 with the ggplot2 and GGally packages.

Results. Data have been obtained indicating a more pronounced synergistic effect of the studied factors on the intensity of lipid peroxidation in tissues when they are combined in an experimental model of contusion injury of the musculoskeletal system. When applying a course of artificial aeronization to healthy animals, a dose-dependent effect was obtained on the level of lipid peroxidation in lung tissue (the zone of contact with the factor).

Conclusions. The combined use of the studied factors shows significantly better functioning of the antioxidant system in the muscle tissue of the hind limb in the injury zone, as evidenced by a lower level of induced lipid peroxidation relative to the control group.

Keywords: *synergism, hydrogen sulfide, mineral waters, artificial ionization, aeroions, antioxidant system, lipid peroxidation, contusion injury, Wistar rats.*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:
Reps K.G. — https://orcid.org/0000-0001-8557-3809; eLibrary SPIN: 3825-8857;
Corresponding author: Reps K.G. — e-mail: kirillreps@gmail.com

TO CITE THIS ARTICLE:
Reps K.G. Mechanisms of synergismic antioxidant effect of negative aeroions and sulfide mineral waters: experimental controlled study. *Problems of Balneology, Physiotherapy and Exercise Therapy.* 2026;103(1):43–50. (In Russ.).
https://doi.org/10.21320/2309-1355-2026-103-1-43-50

Введение

Климатотерапия как базовый фактор непрерывного действия и природные минеральные воды в разных вариантах их применения являются ключевыми компонентами санаторно-курортного лечения. Расширение рекомендаций в рамках медицинских технологий профилактического и восстановительного лечения основывается на механизме действия природных лечебных факторов [1, 2].

По данным Y.H. Cheng et al. [3], легкие отрицательные аэроионы (ОАИ), будучи биологически активными молекулами, могут модифицировать антиоксидантные и противовоспалительные процессы в тканях. В исследованиях на экспериментальной модели острого повреждения легких, вызванного липополисахаридом, показано, что ОАИ обеспечивают защиту ткани активацией механизмов аутофагии и подавления инфильтрации лейкоцитов при остром респираторном дистресс-синдроме [3].

В связи с этим актуально изучение не только механизмов действия отдельных факторов, но и их синергетического взаимодействия на местном и системном уровнях. Окислительно-восстановительные процессы лежат в основе многих

физиологических и патологических состояний, а окислительный стресс связан с большим количеством патологий и проявляется повышением внутриклеточного уровня активных форм кислорода, вызывающих повреждение липидов, белков и ДНК.

В то же время стимулирующее действие умеренных доз стрессоров, имеющих силу, недостаточную для проявления патологических изменений (гормезис), может повысить неспецифическую резистентность организма к действию патогенных факторов, в том числе за счет повышения уровня ферментов антиоксидантной защиты: супероксиддисмутазы (СОД), каталазы и глутатионпероксидазы (ГП).

Понимание механизмов сочетанного и/или комбинированного применения природных лечебных факторов различной природы является актуальным при разработке персонализированных методов восстановления и коррекции нарушений состояния здоровья.

Цель — анализ эффекта синергизма ОАИ и сульфидных минеральных вод на систему антиоксидантной защиты тканей легких здоровых крыс и с экспериментальной моделью контузионной травмы структур опорно-двигательного аппарата.

Материалы и методы

Эксперимент проведен на 66 половозрелых крысах-самцах линии Вистар массой 200–220 г, содержащихся в стандартных условиях вивария Пятигорского ГНИИК ФФГБУ ФНКЦ МРиК ФМБА России, регламентированных СП 2.2.1.3218-14, ГОСТ 33215-2014. Работа с животными проводилась по принципам гуманного обращения с животными, в соответствии с требованиями Европейской конвенции по защите позвоночных животных, используемых в эксперименте и других научных целях (ETS №123, Strasbourg, 1986) с изменениями от 22 июня 1998 г.

При моделировании контузионных травм структур опорно-двигательного аппарата (ушиба корешков поясничного отдела позвоночника крыс, спинномозговые нервы L4/L6) в качестве воздействующего фактора использовалась специализированная установка с полой трубой, в которой груз массой 350 г сбрасывался на область повреждения. Перед проведением моделирования травмы животные получали хлоралгидратный наркоз (350 мг/кг) внутрибрюшинно.

Экспериментальные животные были рандомизированы методом случайного определения участников групп согласно дизайну эксперимента на 2 блока исследований — 11 групп по 6 животных в каждой.

Первый блок — оценка эффекта влияния компонентов природных лечебных факторов на уровень антиоксидантной системы в тканях легкого у здоровых животных:

- 1-я группа (контрольная 1) — интактные животные;
- 2-я группа (опытная 1) — здоровые животные с курсом искусственной ионизации (10 процедур по 30 минут ежедневно 5 раз в неделю);
- 3-я группа (опытная 2) — здоровые животные с курсом искусственной ионизации (10 процедур по 2 часа ежедневно 5 раз в неделю);
- 4-я группа (опытная 3) — здоровые животные с курсом сероводородных ванн 10 мг/л (8 процедур через день);
- 5-я группа (опытная 4) — здоровые животные с сочетанным применением курсов искусственной ионизации (2 часа ежедневно) и сероводородных ванн (10 мг/л; 8 процедур через день);
- 6-я группа (группа сравнения — контроль 2) — здоровые животные с курсом (8 процедур через день) ванн с водопроводной водой 37 °С.

Второй блок — оценка эффекта влияния компонентов природных лечебных факторов на уровень антиоксидантной системы в тканях легкого (зона контакта газообразных компонентов исследуемых факторов) и мышцах в зоне повреждения у животных с экспериментальной моделью контузионного повреждения спинномозговых нервов L4/L6 правой задней конечности:

- 7-я группа (контрольная 3) — животные с контузионной травмой опорно-двигательного аппарата без терапевтического воздействия (негативный контроль);
- 8-я группа (опытная 5) — животные с контузионной травмой опорно-двигательного аппарата с курсом сероводородных ванн (10 мг/л; 8 процедур через день);
- 9-я группа (опытная 6) — животные с контузионной травмой опорно-двигательного аппарата с курсом искусственной ионизации (10 процедур по 2 часа ежедневно 5 раз в неделю);
- 10-я группа (опытная 7) — животные с контузионной травмой опорно-двигательного аппарата с сочетанным применением курсов искусственной ионизации (2 часа ежедневно) и сероводородных ванн (10 мг/л; 8 процедур через день);
- 11-я группа (контрольная 4 — группа сравнения) — животные с контузионной травмой опорно-двигательного аппарата с курсом ванн (8 процедур через день) с водопроводной водой 37 °С.

Процедуры сероводородных ванн проводили с использованием минеральной воды Пятигорского источника №2 (минерализация — 5,3 г/л, свободная CO_2 (г/л), концентрация H_2S — 0,01 г/л), 8 ванн через день, температура воды в ванне — 37 °С, экспозиция — 15 минут с частотой 3–4 раза в неделю.

Методика проведения искусственной аэроионизации в экспериментальных исследованиях в лабораторных условиях обусловлена изменчивой и непостоянной концентрацией ОАИ

в окружающей среде и невозможностью отследить дозозависимый эффект. Перед экспериментальными процедурами крыс размещали в отдельной экспериментальной комнате, в которой была проведена оценка уровня аэроионизации воздуха с помощью сертифицированного прибора «Малогабаритный аэроионный счетчик МАС-0»1 (№20429-11 в Госреестре СИ) с целью контроля уровня ионизации до процедуры и после нее продолжительностью 30 минут и 2 часа. Процедуры искусственной аэроионизации проводились в специальных пластиковых коробках (длина — 50 см, ширина — 40 см, высота — 100 см), в которых генератор ОАИ обеспечивал их концентрацию приблизительно 4×10^4 легких ОАИ на кубический сантиметр (высокоплотное воздействие). Эта концентрация была определена путем объединения клинических данных и предыдущих экспериментальных исследований [4]. Генератор ОАИ — ионизатор «Ион-эффект», изготовлен и принят в эксплуатацию в соответствии с требованиями ТУ 3468-006-77934300-2006, производство ООО «НПП БИОС».

После выведения животных из эксперимента под хлоралгидратным наркозом (350 мг/кг внутрибрюшинно) забирали кусочки ткани легкого и мышц в зоне повреждения правой задней конечности массой 500 мг, в постъядерной фракции гомогенатов которых определялся уровень малонового диальдегида (МДА), спонтанного и индуцированного перекисного окисления липидов (ПОЛ). При расчетах содержания МДА в пробе использовали коэффициент мольной экстинкции $1{,}56 \times 10^{-5}$ $М^{-1}$ $см^{-1}$, результаты выражали в миллимолях МДА на грамм ткани для определения уровня ПОЛ *in vivo* и в миллимолях МДА на грамм ткани за час инкубации для определения уровня спонтанного и индуцированного ПОЛ *in vitro* (оценка уровня антиоксидантной системы).

Уровень ферментов антиоксидантной защиты (СОД (мкг/мл) и ГП (нг/мл)) определяли в сыворотке крови крыс с использованием твердофазного иммуноферментного метода и видоспецифических реактивов Cloud-Clone и BLUE GENE (Белки Антитела, РФ).

Статистическая обработка результатов

При анализе данных применялись методы вариационной статистики с использованием пакета прикладных программ StatPlus 7.0. Для сравнения средних значений в группах применяли методы ANOVA с пост-тестом по Ньюмену—Кейлсу. Различия считались статистически значимыми при $p<0{,}05$.

Многомерный анализ и визуализация экспериментальных данных выполнены на языке программирования R версии 4.5.0 с помощью пакетов ggplot2 и GGally [5, 6].

Результаты и обсуждение

Реактивные формы кислорода — супероксидный анион (O_2), перекись водорода (H_2O_2) и гидроксильные радикалы (OH^-) — являются побочными продуктами аэробного обмена в клетках, и ферментативная антиоксидантная система (СОД, каталаза, ГП) удерживает эти процессы в физиологических пределах [2]. Компоненты природных лечебных факторов, такие как легкие ОАИ (O_2), стимулируют антиоксидантную систему тканей-мишеней, в частности, легких [3].

Полученные нами данные по уровню продуктов ПОЛ в ткани легкого здоровых экспериментальных животных свидетельствуют о дозозависимости этого влияния. Так, после 2 часов воздействия искусственной аэроионизации уровень МДА в ткани легкого здоровых животных был ниже, чем после 30 минут физиотерапевтического воздействия и составил 83,4%, $p<0{,}05$ (табл. 1). После курса сероводородных ванн в ткани легкого здоровых животных отмечался еще более низкий уровень МДА по сравнению с интактными значениями (68,2%; $p<0{,}05$). При сочетанном воздействии двух факторов эта тенденция сохранялась. Следует отметить, что направленность эффектов влияния исследуемых факторов сохранялась при индуцируемой железом переменной валентности ПОЛ в ткани легкого, что свидетельствует об активации уровня антиоксидантной защиты.

При этом механизмы влияния легких ОАИ и H_2S из сероводородных вод на систему антиоксидантной защиты ткани легкого отличаются (разные ферментативные звенья антиоксидантной системы). Согласно литературным данным, ОАИ экспрессируют в основном синтез СОД и каталазы, тогда как H_2S является медиатором посттрансляционных процессов S-сульгидратации белков (основным клеточным донором этого процесса является глутатион) [7].

Вероятно, с этим и связано более выраженное влияние бальнеопроцедур с сероводородсодержащими минеральными водами (газообразный H_2S) на спонтанное и индуцированное ПОЛ в ткани легкого здорового животного по сравнению с воздействием курса легких ОАИ (на 13,2%; $p<0{,}05$) (**табл. 1**).

В ткани легкого животных с моделью контузионной травмы структур опорно-двигательного аппарата не регистрировалось изменения уровня антиоксидантной защиты (**табл. 2**). Вероятно, это связано с патологическим дистрессом и изменением направления компенсаторных реакций в разных тканях.

Комплексное применение двух природных лечебных факторов демонстрирует синергизм и хороший антиоксидантный эффект, снижая окислительные процессы на тканевом уровне гораздо эффективней, чем монофакторное воздействие

Таблица 1. **Влияние факторов различной природы на интенсивность перекисного окисления липидов в ткани легкого здоровых животных**

Table 1. **The effect of factors of various nature on the intensity of lipid peroxidation in lung tissue of healthy animals**

Группы/показатели	МДА, ммоль МДА/г ткани	Спонтанное ПОЛ, ммоль МДА/г ткани в час	Индуцированное ПОЛ, ммоль МДА/г ткани в час
Интактные	27,1 [25,20; 30,48]	87,1 [79,20; 103,68]	185,8 [124,92; 254,16]
30 минут ионизации	27,4 [22,20; 29,28]	79,9 [78,12; 81,72]	93,6 [72,36; 106,20]
2 часа ионизации	22,8 [20,76; 24,84]*	77,0 [74,88; 83,52]	70,6 [65,52; 74,52]
Курс H_2S-ванн	18,5 [15,72; 20,52]*	74,2 [67,68; 83,88]*	61,2 [53,64; 69,84]*
2 фактора	19,4 [18,12; 20,40]	77,8 [76,32; 82,44]	68,4 [61,20; 74,52]
Водопроводная вода	22,6 [20,88; 25,32]	85,0 [84,96; 97,92]	67,7 [56,88; 74,16]

Примечание. Интактные — здоровые животные (контроль 1); 30 минут ионизации — здоровые животные с курсом искусственной ионизации продолжительностью 30 минут; курс H_2S-ванн — курс ванн с минеральной сероводородной водой; 2 часа ионизации — здоровые животные с курсом искусственной ионизации продолжительностью 2 часа; 2 фактора — сочетанное применение процедур искусственной аэроионизации продолжительностью 2 часа и ванн с минеральной сероводородной водой; водопроводная вода — контроль 2 (группа сравнения), здоровые животные с курсом ванн с водопроводной водой; * — $p<0,05$, достоверно значимые различия по сравнению со значениями в группе интактных животных.

Таблица 2. **Влияние факторов различной природы на интенсивность перекисного окисления липидов в ткани легкого у животных с моделью контузионной травмы опорно-двигательного аппарата**

Table 2. **The effect of factors of various nature on the intensity of lipid peroxidation in lung tissue in animals with a model of contusion injury of the musculoskeletal system**

Группы/показатели	МДА, ммоль МДА/г ткани	Спонтанное ПОЛ, ммоль МДА/г ткани в час	Индуцированное ПОЛ, ммоль МДА/г ткани в час
ТК без воздействия	91,2 [85,44; 101,28]	286,6 [269,28; 296,28]	280,1 [266,04; 301,68]
ТК +2 часа ионизации	83,8 [71,64; 89,40]	299,5 [263,16; 356,40]	300,2 [285,48; 347,40]
ТК + курс H_2S-ванн	87,4 [84,60; 92,64]	303,8 [297,00; 307,44]	350,6 [333,36; 347,76]
ТК + 2 фактора	93,4 [89,28; 99,60]	274,3 [270,36; 278,28]	275,8 [261,72; 285,48]
ТК + курс ванн с водопроводной водой	83,8 [78,24; 90,72]	273,4 [254,16; 298,44]	280,8 [270,36; 292,32]

Примечание. ТК — экспериментальная модель контузионной травмы структур опорно-двигательного аппарата; ТК без воздействия (контроль 1) — животные с экспериментальной моделью без терапевтического воздействия; ТК + 2 часа ионизации — животные с моделью контузионной травмы структур опорно-двигательного аппарата с курсом искусственной ионизации продолжительностью 2 часа; ТК + курс H_2S-ванн — животные с моделью контузионной травмы структур опорно-двигательного аппарата с курсом ванн с сероводородной минеральной водой; ТК + курс ванн с водопроводной водой — животные с моделью контузионной травмы структур опорно-двигательного аппарата с курсом ванн с водопроводной водой.

каждого из факторов. Сочетанные воздействия (минеральной воды и аэроионизации) могут проводиться при меньшей интенсивности и продолжительности, что уменьшает их нагрузочность на организм и улучшает их переносимость. Такой тип взаимодействия характеризуется значительным усилением эффекта одного фактора под влиянием другого, в результате чего конечный эффект превышает сумму эффектов каждого их них.

В литературе рассматривается вопрос о том, что легко диффундирующие малые молекулы, включая H_2S, способны выступать в роли модуляторов различных сигнальных путей, и большая часть этих сигналов возникает в результате модификации специфических и критически важных остатков цистеина в белках-мишенях [8].

В ткани мышц задней конечности в зоне повреждения у крыс с моделью контузионной травмы структур опорно-двигательного аппарата отмечается выраженный антиоксидантный эффект исследуемых факторов, причем уровень МДА в ткани мышц животных с сочетанным применением двух факторов более низкий (**табл. 3**).

В сыворотке крови животных этой группы также регистрировался самый высокий уровень ГП (2,32 (2,21; 2,40) нг/мл) по сравнению со значениями в группе животных с курсом сероводородных ванн (1,47 (1,24; 1,63) нг/мл) и с курсом искусственной аэроионизации (0,80 (0,70; 0,92) нг/мл) ($p<0,05$), причем уровень СОД в сыворотке крови крыс во всех группах был низкий и примерно одинаков.

В работе В.С. Улащик (2016) отмечается, что результат взаимодействия физических факторов чаще всего проявляется как изменение степени выраженности эффекта. Это супрааддитивный синергизм, или потенцирование.

Таблица 3. **Влияние факторов различной природы на интенсивность перекисного окисления липидов в ткани мышц из зоны поражения у крыс с моделью контузионной травмы структур опорно-двигательного аппарата**

Table 3. **The effect of factors of various nature on the intensity of lipid peroxidation in muscle tissue from the affected area in rats with a model of contusion injury to the musculoskeletal system structures**

Группы/показатели	МДА, ммоль МДА/г ткани	Спонтанное ПОЛ, ммоль МДА/г ткани в час	Индуцированное ПОЛ, ммоль МДА/г ткани в час
ТК без воздействия	41,0 [39,00; 48,12]	155,5 [124,20; 173,88]	272,9 [225,72; 278,64]
ТК +2 часа ионизации	47,3 [34,32; 53,04]	139,0 [136,80; 146,52]	240,5 [230,04; 255,24]
ТК + курс H_2S-ванн	61,2 [50,52; 63,24]	200,9 [174,24; 278,28]	319,7 [276,48; 347,76]
ТК + 2 фактора	40,6 [34,44; 45,60]	137,5 [121,68; 152,28]	196,6 [191,52; 197,28]*
ТК + курс ванн с водопроводной водой	46,3 [33,60; 55,08]	140,0 [119,52; 160,02]	236,2 [199,08; 280,08]

Примечание. ТК — экспериментальная модель контузионной травмы структур опорно-двигательного аппарата; ТК без воздействия (контроль 1) — животные с экспериментальной моделью без терапевтического воздействия; ТК + 2 часа ионизации — животные с моделью контузионной травмы структур опорно-двигательного аппарата с курсом искусственной ионизации продолжительностью 2 часа; ТК + H_2S — животные с моделью контузионной травмы структур опорно-двигательного аппарата с курсом ванн с сероводородной минеральной водой; ТК + курс ванн с водопроводной водой — животные с моделью контузионной травмы структур опорно-двигательного аппарата с курсом ванн с водопроводной водой; * — $p<0,05$, достоверно значимые различия по сравнению контрольной группой без воздействия.

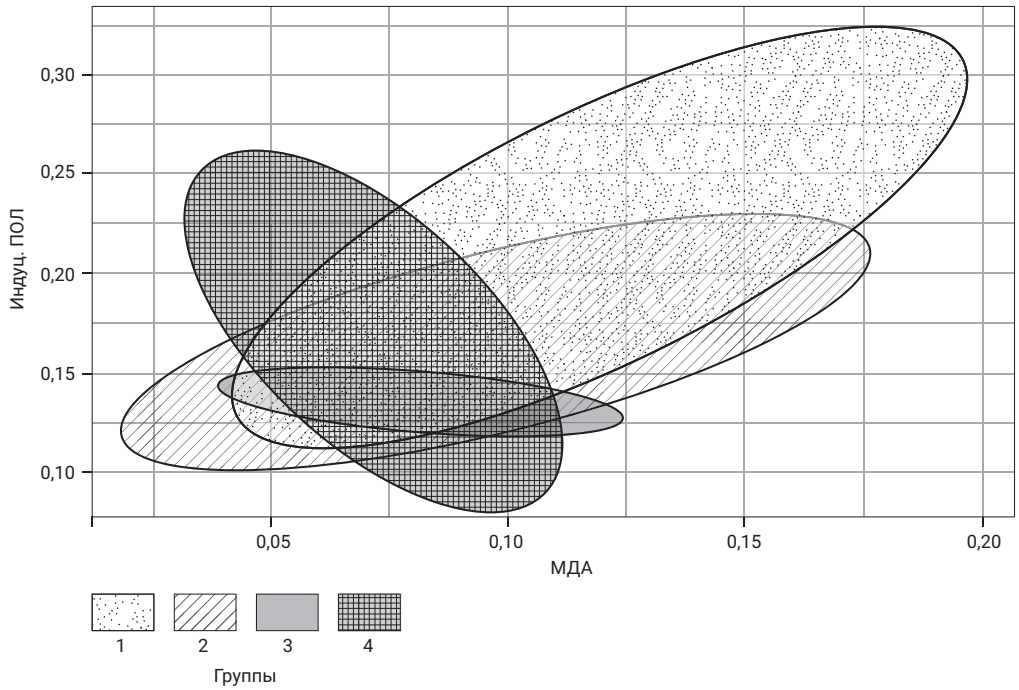

Рис. 1. **Соотношение уровня перекисного окисления липидов *in vivo* и индуцированного *in vitro* в ткани мышц задней конечности крыс с контузионной травмой опорно-двигательного аппарата после курса процедур искусственной аэроионизации и сероводородных ванн и их сочетания.**

Группа 1 — животные с курсом сероводородных ванн (10 мг/л; 8 процедур через день) с травмой опорно-двигательного аппарата; группа 2 — животные с курсом искусственной ионизации (10 процедур по 2 часа ежедневно 5 раз в неделю) с травмой опорно-двигательного аппарата; группа 3 — животные с сочетанным применением курсов искусственной ионизации (2 часа ежедневно) и сероводородных ванн (10 мг/л; 8 процедур через день) с травмой опорно-двигательного аппарата; группа 4 — животные с травмой опорно-двигательного аппарата без воздействия (негативный контроль).

Fig. 1. **Ratio of lipid peroxidation levels *in vivo* and *in vitro*-induced in muscle tissue of the hind limb in rats with musculoskeletal contusion injury after a course of artificial air ionization and hydrogen sulfide bath procedures and their combination.**

Group 1 — animals with a course of hydrogen sulfide baths (10 mg/L; 8 sessions every other day) and musculoskeletal injury; Group 2 — animals with a course of artificial ionization (10 sessions of 2 hours daily, 5 times per week) and musculoskeletal injury; Group 3 — animals with combined application of artificial ionization courses (2 hours daily) and hydrogen sulfide baths (10 mg/L; 8 sessions every other day) and musculoskeletal injury; Group 4 — animals with musculoskeletal injury without intervention (negative control).

Такой тип взаимодействия можно выразить формулой:

$$Э_{АБ} > Э_А + Э_Б ,$$

где $Э_А$ и $Э_Б$ — это эффекты, вызываемые соответственно физическими факторами А и Б при их отдельном воздействии, $Э_{АБ}$ — это эффект, наблюдаемый при их комбинированном применении [9]. В нашем случае по уровню антиоксидантного фермента ГП после сочетанного применения двух факторов на модели контузионной травмы конечностей, скорее всего, регистрировался супрааддитивный эффект, или потенцирования действия факторов на экспериментальной модели, в патогенезе которой окислительный стресс занимает одно из ведущих патологических звеньев (1,47 + 0,80 = 2,27, то есть 2,32 нг/мл>2,27 нг/мл). Это связано с местным действием сероводородных ванн (неспецифическим тепловым эффектом и специфическим — влияние H_2S) и системным влиянием ОАИ.

При проведении многомерного анализа экспериментальных данных с помощью программы R версии 4.5.0 с помощью пакетов ggplot2 и GGally [5, 6] получены графики соотношения уровня МДА в ткани *in vivo* и в результате индукции железом переменной валентности (F^{2+}) *in vitro* в ткани мышц задней конечности крыс с экспериментальной контузионной травмой структур опорно-двигательного аппарата при применении курсов искусственной аэроионизации и ванн с сероводородсодержащей минеральной водой (**рис. 1**).

На **рис. 1** видно, что минимальный уровень индуцированного ПОЛ регистрируется в ткани мышц после сочетанного применения курса двух исследуемых факторов (группа 3) по сравнению с контрольной группой 4 (p<0,05). При количественной оценке взаимодействия факторов и расчете коэффициента эффективности сочетания (Кэс) по В.С. Улащику [9] ($К_{ЭС}$=эффект сочетанного воздействия / эффект базового метода) наибольшее значение Кэс=0,82 получено в группе 2 по сравнению с Кэс=0,62 (показатели индуцированного ПОЛ в группе 1).

Таким образом, сочетанное применение факторов одной направленности действия (антиоксидантной), при этом воздействующих на разные звенья антиоксидантной защиты клеток, потенцировало метаболический эффект, снизив уровень индуцированного ПОЛ почти в 2 раза (см. **рис. 1**).

Взаимодействия между различными антиоксидантными компонентами могут быть синергетическими, и совокупный эффект двух компонентов намного больше, чем сумма эффектов каждого агента, применяемого в отдельности.

Заключение

Определена степень влияния ОАИ как лечебного фактора, инициирующего каскад биохимических реакций в организме или его отдельных систем в состояние повышенной чувствительности к другому физическому фактору. Синергизм влияния сероводорода и легких ОАИ, согласно полученным данным, представляет собой результат воздействия на эндогенную антиоксидантную систему организма, снижает уровень реактивных форм кислорода и обеспечивает защиту клеток от окислительного стресса.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Disclosure. The authors declare no competing interests.
Вклад авторов. Репс К.Г. — концепция и дизайн исследования, сбор и анализ материала, написание и редактирование текста.
Author contribution. Reps K.G. — study concept and design, data collection and analysis, text writing and editing.
Информация о финансировании. Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.
Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.
Благодарности. Автор выражает благодарность старшему лаборанту экспериментальной лаборатории с виварием Скворцовой Ж.А. за помощь в проведении реакций перекисного окисления липидов в гомогенатах тканей.
Acknowledgments. The author expresses gratitude to the senior laboratory assistant of the experimental laboratory with a vivarium, Skvortsova J.A., for her help in carrying out lipid peroxidation reactions in tissue homogenates.

Литература/References

1. Deng L, Deng Q. The basic roles of indoor plants in human health and comfort. Environ. *Sci. Pollut. Res*. 2018;25:36087–36101.
DOI: 10.1007/s11356-018-3554-1.
2. Репс В.Ф., Репс К.Г. Анализ механизмов действия отдельных компонентов природных курортных факторов в структуре климатотерапии на среднегорных курортах региона Кавминвод. *Курортная медицина*. 2022;4:5–9.
DOI: 10.51871/2304-0343_2022_4_5.
Reps VF, Reps KG. Analysis of the mechanisms of action of individual components of natural resort factors in the

structure of climatotherapy at mid-mountain resorts of the Caucasian Mineral Waters region. *Resort Medicine*. 2022;4:5–9. (In Russ.).
DOI: 10.51871/2304-0343_2022_4_5.

3. Cheng YH, Li HK, Yao CA, Huang JY, Sung YT, Chung SD, Chien CT. Negative air ions through the action of antioxidation, anti-inflammation, anti-apoptosis and angiogenesis ameliorate lipopolysaccharide induced acute lung injury and promote diabetic wound healing in rat. *PLoS One*. 2022;17(10):0275748.
DOI: 10.1371/journal.pone.0275748.
4. Bowers B, Flory R, Ametepe J, Staley L, Patrick A, Carrington H. Controlled trial evaluation of exposure duration to negative air ions for the treatment of seasonal affective disorder. *Psychiatry Res*. 2018;259:7–14.
DOI: 10.1016/j.psychres.2017.08.040.
5. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2021. https://www.R-roject.org/
6. Wickham H. Ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York, 2016.
DOI: 10.1007/978-3-319-24277-4.
7. Ju Y, Fu M, Stokes E, Wu L, Yang G. H_2S-Mediated Protein S-Sulfhydration: A Prediction for Its Formation and Regulation. *Molecules*. 2017;22(8):1334.
DOI: 10.3390/molecules22081334.
8. Finkel T. From sulfenylation to sulfhydration: what a thiolate needs to tolerate. *Sci Signal*. 2012;5(215):10.
DOI: 10.1126/scisignal.2002943.
9. Улащик В.С. Сочетанная физиотерапия: общие сведения, взаимодействие физических факторов. *Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры*. 2016;6:4–11.
DOI: 10.17116/kurort201664-11.
Ulashchik VS. Combined physiotherapy: general information, interaction of physical factors. *Issues of balneology, physiotherapy and therapeutic physical education*. 2016;6:4–11. (In Russ.).
DOI: 10.17116/kurort201664-11.

Получена 21.12.2025
Received 21.12.2025
Принята в печать 24.02.2026
Accepted 24.02.2026