



СОСТОЯНИЕ ОКИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБРАЗЦАХ ТЕСТИКУЛЯРНОЙ ТКАНИ ПОСЛЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

М.А. Аль Меселмани

Полесский государственный университет, ул. Днепровской флотилии, д. 23, г. Пинск, 225710, Республика Беларусь

Резюме. Цель исследования: изучение окислительных процессов в тестикулярных тканях после γ -облучения. Материал и методы. С помощью полярографического метода исследована скорость поглощения кислорода на эндогенных и экзогенных субстратах ($V_{\text{энд}}$, $V_{\text{як}}$, $V_{\text{глу}}$, $V_{\text{днф}}$) и при специфических ингибиторах тканевого дыхания амиталя и малоната натрия ($V_{\text{ам}}$, $V_{\text{мал}}$) в тестикулярных тканях в разные сроки (3-и, 10-е, 40-е сутки) после тотального однократного γ -облучения (1,0 Гр). Результаты. Установлено, что на ранних сроках (72 часа) после облучения следующие показатели уменьшились: $V_{\text{энд}}$ – на 14,7 % ($p < 0,05$); $V_{\text{як}}$ – на 18,6 % ($p < 0,05$) и $V_{\text{глу}}$ – на 10,9 % ($p < 0,05$) по сравнению с контролем. Спустя 10 суток, напротив, наблюдалось увеличение: ($V_{\text{энд}}$) на 108,2 % ($p < 0,05$), в присутствии экзогенных субстратов сукцината и глутамата, повышались ($V_{\text{як}}$) на 45,1 % ($p < 0,05$) и ($V_{\text{глу}}$) на 112 % ($p < 0,05$), $SD_{\text{днф}}$ снижался на 12,8 % ($p < 0,05$), а при ингибиторах, малонатрезистентное дыхание (МРД) повышалось на 9,4 % ($p < 0,05$). На 40-е сутки ($V_{\text{энд}}$, $V_{\text{як}}$, $V_{\text{глу}}$) возрастали соответственно на 120,7 % ($p < 0,05$), 124,8 % ($p < 0,05$) и 97,1 % ($p < 0,05$), снизились $SD_{\text{днф}}$ на 11,5 % ($p < 0,001$), амиталярезистентное дыхание (АРД) на 30,6 % ($p < 0,05$) и МРД на 11,7 % ($p < 0,05$).

Заключение. Усиление поглощения кислорода сопровождалось достоверным снижением $SD_{\text{днф}}$ в обеих подопытных группах (10-е и 40-е сутки), что предполагало угрозу разобщения процессов окисления и фосфорилирования. А снижение МРД свидетельствует также об уменьшении вклада жирных кислот (ЖК) в энергообеспечение тестикулярной ткани.

Ключевые слова: семенники, митохондрии, окисление, малые дозы γ -излучения, сперматозоид, крыса.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование проводилось без спонсорской поддержки.

Соответствие нормам этики. Авторы подтверждают, что соблюдены правила обращения с животными в случаях их использования в работе.

Для цитирования: Аль Меселмани М.А. Состояние окислительных процессов в образцах тестикулярной ткани после ионизирующего излучения. Вестник медицинского института «РЕАВИЗ»: Реабилитация, Врач и Здоровье. 2024;14(6):17-23. <https://doi.org/10.20340/vmi-rvz.2024.6.MORPH.3>

THE STATE OF OXIDATIVE PROCESSES IN TESTICULAR TISSUE SAMPLES AFTER IONIZING RADIATION

Mohanad Ali Al Meselmani

Polessky State University, 23, Dneprovskoy Flotiliya st., Pinsk, 225710, Republic of Belarus

Abstract. Aim. To study of oxidative processes in testicular tissues after gamma irradiation. Material and methods. Using the polarographic method, the rate of oxygen absorption on endogenous and exogenous substrates (V_{end} , V_{suc} , V_{glu} , V_{dnf}) and with specific inhibitors of tissue respiration of amytal and sodium malonate (V_{am} , V_{mal}) in testicular tissues at different times (3, 10, 40 days) after total single gamma irradiation (1.0 Gr).

Results. It was found that, in the testicular tissues of rats at different times (3rd, 10th, 40th day) after total single gamma irradiation (1.0 Gy). In the early period (72 hours) after irradiation, (V_{end}) decreased by 14.7 % ($p < 0,05$), (V_{suc}) by 18.6 % ($p < 0,05$) and (V_{glu}) by 10.9 % ($p < 0,05$) compared with the control. After 10 days, on the contrary, there was an increase in (V_{end}) by 108.2 % ($p < 0,05$), in the presence of exogenous succinate and glutamate substrates, increased (V_{suc}) by 45.1 % ($p < 0,05$) and (V_{glu}) by 112 % ($p < 0,05$), SD_{dnf} decreased by 12.8 % ($p < 0,05$), and with inhibitors, low-resistance respiration (MRD) increased by 9.4 % ($p < 0,05$). On day 40 (V_{end} , V_{suc} , V_{glu}) increased by 120.7 % ($p < 0,05$), 124.8 % ($p < 0,05$) and 97.1 % ($p < 0,05$), respectively, SD_{dnf} decreased by 11.5 % ($p < 0,001$), amytal resistant respiration (ARD) by 30.6 % ($p < 0,05$) and MRD by 11.7 % ($p < 0,05$). **Conclusion.** Increased oxygen uptake was accompanied by a significant decrease in SD_{dnf} in both experimental groups (10th and 40th days), which suggested the threat of disconnection of oxidation and phosphorylation processes. A decrease in MPD also indicates a decrease in the contribution of fatty acids (FA) to the energy supply of testicular tissue.

Key words: testis, mitochondria, oxidation, low-dose γ -radiation, sperm, rat.

Competing interests. The authors declare no competing interests.

Funding. This research received no external funding.

Compliance with ethical principles. The authors confirm that the rules of treatment of animals when they are used in the study.

Cite as: Al Meselmani M.A. The state of oxidative processes in testicular tissue samples after ionizing radiation. Bulletin of the Medical Institute "REAVIZ": Rehabilitation, Doctor and Health. 2024;14(6):17-23. <https://doi.org/10.20340/vmi-rvz.2024.6.MORPH.3>

Введение

Радиация является одним из наиболее опасных факторов окружающей среды, влияющих на здоровье человека. В последнее время радиационный риск повышается из-за широкого применения в самых разных областях человеческой деятельности, особенно в медицине, технике и промышленности. Поэтому проблема нежелательных влияний радиации на организм человека и, особенно, на его репродуктивную систему, всё ещё остаётся актуальной для биологии и медицины. Важно подчеркнуть, что в литературных данных имеются раздельные сведения об отрицательных воздействиях различных доз радиации, внешнего и внутреннего типа облучения на морфологическое и функциональное состояние мужской репродуктивной системы [1, 2, 3]. Мамина и др. показали структурно-функциональное повреждение семенников при условии повышенного радиационного фона, в том числе однократного внешнего облучения [4, 5].

Литературные данные подтверждают, что вредные эффекты наблюдаются при применении радиации в диагностических и лечебных целях разных заболеваний. Так, было отмечено снижение активности клеток мужской репродуктивной системы, вырабатывающихся мужским половым гормоном – тестостероном, а также изменение концентрации мужских половых гормонов, поэтому для проведения диагностики и лечения разных заболеваний необходимо обратить внимание на то, чтобы дозировки облучения были с минимальным воздействием на здоровые органы обследуемых [6, 7, 8].

Одним из важных негативных воздействий ионизирующего излучения является создание окислительного стресса, который вызывает крупномасштабное разрушение или повреждение различных биомолекул.

Учитывается, что семенники имеют первостепенное значение для размножения и эволюции вида, а также выполняют две основные функции: выработка половых клеток (сперматозоидов) и синтез/секреция гормонов (в первую очередь тестостерона). Поэтому они являются тканями с высокой потребностью энергии, выполняющими энергозатратные процессы [9].

Однако применение кислорода во многих важных метаболических процессах живыми системами обошлось в эволюционную цену, поскольку метаболизм кислорода может привести к образованию активных форм кислорода (АФК). В научных работах показано, что увеличение выработки АФК, как из-за внутренних, так и из-за внешних факторов, может вызвать окислительный стресс, влекущий изменения в структуре и функции фосфолипидов и белков. В ядре АФК атакуют ДНК, вызывая её фрагментацию и активацию апоптоза, тем самым изменяя экспрессию генов и белков. Накопленные данные также

свидетельствуют о том, что эндогенно продуцируемые АФК могут выступать в качестве вторичных посредников в регуляции клеточных сигнальных путей и в передаче сигналов, которые отвечают за регулирование самообновления и пролиферации сперматогоний [10, 11, 12].

Ранее Аль Меселмани М.А. показал, что на эндогенных и экзогенных субстратах окислительные процессы воздействуют с поступлением разных количеств цезия ^{137}CS [2].

Целью настоящего исследования является изучение воздействия эндогенных и экзогенных субстратов в кусочках ткани мужской репродуктивной системы в условиях внешнего радиационного облучения.

Методы и материалы

В исследовании были использованы беспородные белые крысы-самцы линии Wistar массой 220-240 г ($n = 36$). Крыс разделили на четыре группы, из которых одна группа – контрольная, а три остальные – подопытные. Количество крыс контрольной группы (9) облучению не подвергались. Крыс подопытных групп облучали дозой 1,0 Гр (мощности 0,92 Гр/мин) с помощью γ -установки «ИГУР-1» (Москва).

Для проведения анализа крыс трёх подгрупп выводили из эксперимента по истечении с момента облучения 3-х (группа 3сут), 10-ти (группа 10сут) и 40 (группа 40сут) суток соответственно.

Выделение семенников крыс проводили в среде Хенкса при $t = 25^\circ\text{C}$. Ткань измельчали, фильтровали, полученную суспензию центрифугировали в течение 5 мин при 1000 об/мин. Для расчёта количества клеток использовали камеру Горяева. Измерение содержания белка в пробах проводили биуретовым методом. После пермеабилзации клеточных мембран 0,005-процентным раствором дигитонина, для облегчения свободного поступления глутамата в клетки, для оценки параметров поглощения кислорода использовали полярографическую ячейку с закрытым платиновым электродом Кларка [13].

Значения регистрировали в нмоль O_2 /мин на 1 мг белка исследуемой ткани или нмоль O_2 за 1 мин на 10^7 клеток. Чувствительность метода позволяет определять концентрацию кислорода до 1 нМ/л. Измерения проводили в трёх повторях на каждую экспериментальную крысу.

Скорость дыхания ткани семенников оценивали на эндогенных субстратах ($V_{\text{энд}}$), а также и при добавлении в полярографическую ячейку 10 мМ глутамата натрия ($V_{\text{глу}}$). Рассчитывали коэффициент стимулирующего действия (СД) глутаминовой кислоты: $\text{СД}_{\text{глу}} = V_{\text{глу}}/V_{\text{энд}}$.

Также определяли скорость потребления кислорода на экзогенных субстратах (10 ммоль сукцината,

$V_{\text{як}}$: 100 мкмоль 2,4-динитрофенола, $V_{\text{днф}}$). Рассчитывали величины стимулирующего действия янтарной кислоты ($\text{СД}_{\text{як}} = V_{\text{як}}/V_{\text{энд}}$; $\text{СД}_{\text{глу}} = V_{\text{глу}}/V_{\text{энд}}$) и 2,4-динитрофенола ($\text{СД}_{\text{днф}} = V_{\text{днф}}/V_{\text{глу}}$) [2, 14].

Используя метод ингибиторного анализа, путём добавления в инкубационную среду (2,5 ммоль амита-ла натрия, $V_{\text{ам}}$ и 10 ммоль малоната натрия, $V_{\text{мал}}$), рассчитывали показатели амиталрезистентного дыха-ния - $\text{АРД} = V_{\text{ам}}/V_{\text{энд}}$ и малонатрезистентного дыха-ния - $\text{МРД} = V_{\text{мал}}/V_{\text{ам}}$ [2, 14]. Показатели АРД и МРД характеризовали интенсивность окисления флаво-протеидзависимых субстратов, позволяя оценить энергетический вклад жирных кислот (ЖК) [15].

Статистическую обработку результатов выпол-нили с помощью программы «Statistica» 6.0 и Microsoft Excel 2021. Данные проверяли на нор-

мальность распределения с использованием крите-рия хи-квадрата Пирсона. Различия считали стати-стически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты

В ходе серии исследований установлено, что ку-сочки ткани мужской репродуктивной системы жи-вотных характеризуются высоким уровнем потреб-ления кислорода (табл. 1, рис. 1).

Полученные данные о высоком потреблении кислорода в препаратах мужской репродуктивной системы подтверждаются литературными данными, о чём свидетельствуют уникальные характеристики метаболизма и биоэнергетики клеток семенников для поддержки своих функций, выработки сперма-тозоидов и секреции мужских гормонов [9].

Таблица 1. Показатели поглощения кислорода в семенниках крыс после γ -облучения в дозе 1,0 Гр на 3-и, 10-е и 40-е сутки эксперимента
Table 1. Oxygen uptake indicators in rat testes after γ -irradiation at a dose of 1.0 Gy on days 3, 10, and 40 of the experiment

Параметр	Скорость поглощения кислорода						
	Контрольная группа	Группа 3 сут, n = 9	%	Группа 10сут, (n = 9)	%	Группа 40сут, (n = 9)	%
$V_{\text{энд}}$	$3,19 \pm 0,02$	$2,72 \pm 0,07^*$	85,3	$6,64 \pm 0,12^*$	208,2	$7,04 \pm 2,76^*$	220,7
$V_{\text{як}}$	$5,32 \pm 0,31$	$4,33 \pm 0,26^*$	81,4	$7,72 \pm 0,24^*$	145,1	$11,96 \pm 6,68^*$	224,8
$V_{\text{глу}}$	$4,79 \pm 0,29$	$4,27 \pm 0,38$	89,1	$10,17 \pm 0,28^*$	212,3	$9,44 \pm 2,24^*$	197,1
$V_{\text{днф}}$	$6,31 \pm 0,16$	$5,01 \pm 0,44^*$	79,4	$11,81 \pm 0,38^*$	187,2	$12,43 \pm 2,59^*$	150,6
$\text{СД}_{\text{як}}$	$1,66 \pm 0,10$	$1,59 \pm 0,16$	95,8	$1,23 \pm 0,03^*$	74,1	$1,47 \pm 0,37^*$	88,5
$\text{СД}_{\text{глу}}$	$1,46 \pm 0,09$	$1,39 \pm 0,07$	95,2	$1,53 \pm 0,08$	104,8	$1,21 \pm 0,05^{***}$	82,9
$\text{СД}_{\text{днф}}$	$1,33 \pm 0,08$	$1,29 \pm 0,06$	97,0	$1,16 \pm 0,01^*$	87,2	$1,09 \pm 0,04^{***}$	98,5

Примечание: достоверность различий по отношению к контрольной группе: * - $p < 0,05$; ** - $p < 0,01$; *** - $p < 0,001$.

Из данных, приведённых в таблице 1, видно, что ткань мужской репродуктивной системы крыс отли-чалась высоким уровнем потребления кислорода и повышенной чувствительностью к воздействию γ -излучения в дозе 1.0 Гр.

По прошествии 3-х суток (группа 3сут) с момента облучения в дозе 1,0 Гр (мощность дозы 0,92 Гр/мин) отмечалось достоверное снижение интенсивности потребления кислорода препаратами ткани муж-ской репродуктивной системы животных на эндо-генных субстратах ($V_{\text{энд}}$) с $3,19 \pm 0,02$ нмоль $\text{O}_2/\text{мин}/\text{мг}$ в контроле до $2,72 \pm 0,07$ (-14,7 %) ($p < 0,05$), в то время как на 10-е сутки, напротив, наблюдалось увеличение скорости дыхания до $6,64 \pm 0,12$ нмоль $\text{O}_2/\text{мин}/\text{мг}$ (108,2 %) ($p < 0,05$). На 3-и сутки также наблюдалось достоверное сни-жение скорости поглощения кислорода в присут-ствии субстрата сукцината ($V_{\text{як}}$) с $5,32 \pm 0,31$ в кон-троле до $4,33 \pm 0,26$ нмоль $\text{O}_2/\text{мин}/\text{мг}$, т.е. на 18,6 % ($p < 0,05$), которая на 10-е сутки превышала исход-ное значение на 45,1 % ($p < 0,05$), достигнув величи-ны $7,72 \pm 0,24$ нмоль $\text{O}_2/\text{мин}/\text{мг}$. Примерно такая же динамика скорости окисления прослеживалась в присутствии другого экзогенного субстрата - глута-мата. Так, отмечалось снижение скорости потреб-ления кислорода при использовании глутамата с $4,79 \pm 0,29$ в контроле до $4,27 \pm 0,38$ нмоль $\text{O}_2/\text{мин}/\text{мг}$

белка, т.е. на 10,9 % ($p < 0,05$), к 3-м суткам наблю-дения. А по истечении 10-х суток наблюдения ско-рость поглощения кислорода в присутствии глута-мата составила $10,17 \pm 0,28$ (112 %) ($p < 0,05$) (табл. 1, рис. 1).

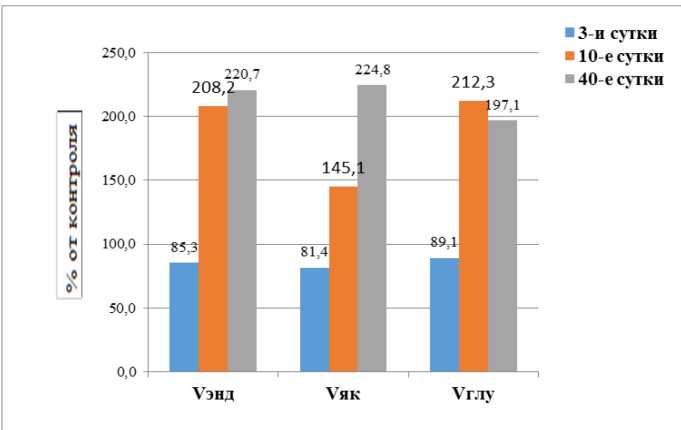


Рисунок 1. Показатели поглощения кислорода в ткани семенников в % по отношению к контролю после однократного γ -облучения (1,0 Гр). Примечание: достоверность различий по отношению к контрольной группе: * - $p < 0,05$; ** - $p < 0,01$; *** - $p < 0,001$

Figure 1. Oxygen uptake indicators in testicular tissue as a percentage relative to the control after a single γ -irradiation (1.0 Gy). Note: Statistical significance compared to the control group: * - $p < 0.05$; ** - $p < 0.01$; *** - $p < 0.001$

В процессе оценки показателей стимулирующего действия сукцината (СД_{як}) и глутамата (СД_{глу}) было отмечено уменьшение СД_{як} по прошествии 10-х суток после облучения. Так, уменьшение СД_{як} на этот момент составило $1,23 \pm 0,03$ по сравнению с контрольным $1,66 \pm 0,10$ (-25,9 %) ($p < 0,05$). Не было обнаружено достоверных изменений показателя СД_{глу} (табл. 1, рис. 2).

Следует отметить, что, с одной стороны, снижение СД_{як} является свидетельством повышения содержания сукцината в митохондриях, но, с другой стороны, демонстрирует уменьшение доли участия сукцината в транспорте энергии к митохондриям ткани семенников [9, 15].

Таблица 2. Показатели поглощения кислорода при использовании амитала натрия и малоната натрия в семенниках крыс после γ -облучения в дозе 1,0 Гр на 3-и, 10-е и 40-е сутки эксперимента
Table 2. Oxygen uptake indicators with the use of sodium amytal and sodium malonate in rat testes after γ -irradiation at a dose of 1.0 Gy on days 3, 10, and 40 of the experiment

Параметр	Скорость поглощения кислорода			
	Контрольная группа	Группа 3 сут, n = 9	Группа 10сут, (n = 9)	Группа 40сут, (n = 9)
Вэнд	$3,34 \pm 0,43$	$2,73 \pm 0,19$	$7,21 \pm 0,11^{**}$	$6,86 \pm 0,02^*$
Vам	$2,53 \pm 0,34$	$1,94 \pm 0,03$	$6,37 \pm 0,04^*$	$4,52 \pm 0,16^*$
Vмал	$2,15 \pm 0,31$	$1,15 \pm 0,12^*$	$5,84 \pm 0,23^*$	$3,15 \pm 0,22^*$
АРД	$0,77 \pm 0,02$	$0,70 \pm 0,03$	$0,88 \pm 0,02^*$	$0,68 \pm 0,02^*$
МРД	$0,85 \pm 0,02$	$0,60 \pm 0,04^*$	$0,93 \pm 0,02^*$	$0,59 \pm 0,07^*$

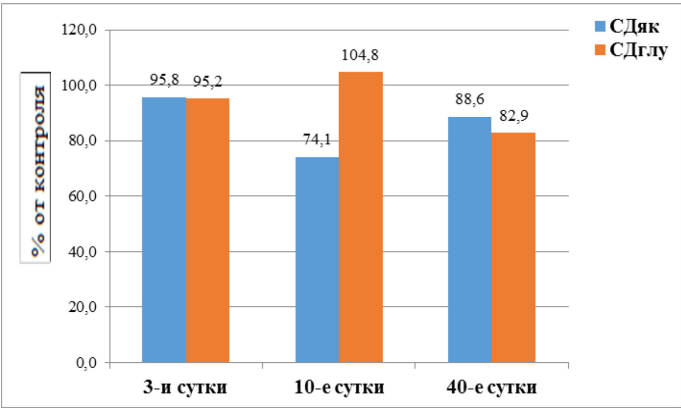


Рисунок 2. Величины стимулирующего действия янтарной кислоты и глутамата, а в ткани семенников в % по отношению к контролю после однократного γ -облучения (1,0 Гр)
Figure 2. The magnitude of the stimulatory effect of succinic acid and glutamate in testicular tissue as a percentage relative to the control after a single γ -irradiation (1.0 Gy)

Для описанной метаболической ситуации (рис. 4) нет оснований говорить об активации на 3-и сутки после облучения системы β -окисления жирных кислот, поскольку коэффициент малонатрезистентного дыхания (МРД) в подопытной группе животных к этому моменту достоверно снижался до $0,60 \pm 0,04$ по сравнению с $0,85 \pm 0,02$ в контроле.

Вместе с тем, спустя десять суток после облучения крыс в дозе 1,0 Гр показатель, характеризую-

Анализы влияния специфических ингибиторов тканевого дыхания амитала натрия (V_{ам}) и малоната натрия (V_{мал}) на окислительные процессы в семенниках крыс представлен в таблице 2. Так, через 3-е суток после облучения скорости поглощения кислорода при V_{ам} и V_{мал} соответственно уменьшались с $2,53 \pm 0,34$ и $2,15 \pm 0,31$ нмоль O₂/мин/мг белка в контроле до $1,94 \pm 0,03$ и $1,15 \pm 0,12$ нмоль O₂/мин/мг белка в опыте. Однако через 10 суток V_{ам} и V_{мал} достоверно возрастали до $6,37 \pm 0,04$ и $5,84 \pm 0,23$ нмоль O₂/мин/мг белка, т.е. на 151 % ($p < 0,05$) и 171 % ($p < 0,05$) соответственно (табл. 2, рис. 3).

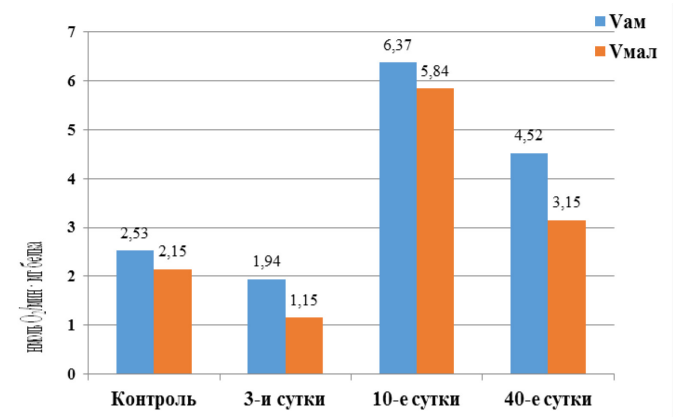


Рисунок 3. Показатели поглощения кислорода в ткани семенников при влиянии ингибиторов после однократного γ -облучения (1,0 Гр)
Figure 3. Oxygen uptake indicators in testicular tissue under the influence of inhibitors after a single γ -irradiation (1.0 Gy)

щий МРД, демонстрировал тенденцию к росту до $0,93 \pm 0,02$ против $0,85 \pm 0,02$ в контроле (табл. 2, рис. 4). Последнее может быть истолковано в пользу увеличения чувствительности дыхательной цепи к действию высокоспецифического ингибитора СДГ малоната натрия.

Опыты, выполненные с добавлением разобщителя процессов окислительного фосфорилирования, подтвердили разнонаправленную динамику

изменения функциональной активности потребления кислорода в образцах семенников крыс на 3-и и 10-е сутки. В частности, $V_{\text{днф}}$ у крыс на 3-и сутки достоверно снижалась на 20,6 % ($p < 0,05$), а на 10-е – достоверно возросла на 87,2 % ($p < 0,05$) (табл. 1, рис. 5). Исходя из величины расчётного коэффициента $\text{СД}_{\text{днф}}$ после облучения в дозе 1,0 Гр на протяжении 3-х суток наблюдения не происходило разобщения дыхания и фосфоримирования в митохондриях семенников (табл. 1). Снижение $\text{СД}_{\text{днф}}$ с $1,33 \pm 0,08$ в контроле до $1,16 \pm 0,01$ ($p < 0,05$) в подопытной группе животных на 10-е сутки свидетельствовала о возможной лабилизации системы окислительного фосфорилирования митохондрий семенников.

В ходе опытов на 40-е сутки наблюдалось сохранение статистически значимо усиленного потребления кислорода в ткани семенников на эндогенных субстратах и возврат показателей скорости окисле-

ния экзогенных субстратов (сукцината и глутамата) к исходным значениям. В частности, усиление поглощения кислорода в присутствии сукцината на 40-е сутки наблюдения составило $11,96 \pm 6,68$ нмоль $\text{O}_2/\text{мин}/\text{мг}$ белка против $5,32 \pm 0,31$ нмоль $\text{O}_2/\text{мин}/\text{мг}$ белка в контроле. В присутствии экзогенного субстрата глутамата скорость потребления кислорода возрастала с $4,79 \pm 0,29$ нмоль $\text{O}_2/\text{мин}/\text{мг}$ белка в контроле до $9,44 \pm 2,24$ нмоль $\text{O}_2/\text{мин}/\text{мг}$ белка (на 152 %) ($p < 0,05$) в подопытной группе. Эндогенное дыхание составило $7,04 \pm 2,76$ против $3,19 \pm 0,02$ нмоль $\text{O}_2/\text{мин}/\text{мг}$ белка в контроле (табл. 1, рис. 1). При оценке коэффициентов $\text{СД}_{\text{як}}$ и $\text{СД}_{\text{глу}}$ отмечено их достоверное снижение. Так, величина $\text{СД}_{\text{глу}}$ на 40-е сутки составляла $1,21 \pm 0,05$ ($p < 0,001$) против $1,46 \pm 0,09$ в контроле, а величина $\text{СД}_{\text{як}}$ составляла $1,47 \pm 0,37$ ($p < 0,05$) против $1,66 \pm 0,10$ в контроле (табл. 1, рис. 2).

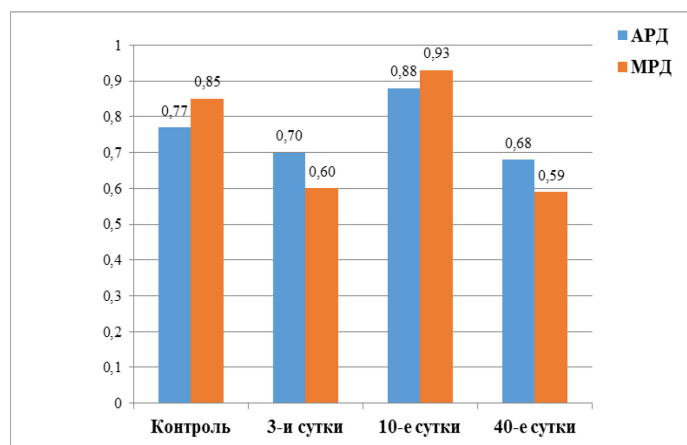


Рисунок 4. Показатели амиталрезистентного и малонатрезистентного дыхания в ткани семенников крыс после однократного γ -облучения (1,0 Гр)

Figure 4. Amytal-resistant and malonate-resistant respiration indicators in rat testicular tissue after a single γ -irradiation (1.0 Gy)

Данные о результатах ингибиторного анализа, выполненного через 40 суток после облучения животных, приведённые в таблице 2, с одной стороны, позволили обнаружить достоверное увеличение интенсивности процессов тканевого дыхания в семенниках после однократного γ -облучения (увеличение $V_{\text{ам}}$ и $V_{\text{мал}}$), что подтвердило феномен стимулирующего влияния радиации на работу митохондрий. С другой стороны, было отмечено снижение резервов жирных кислот в изученных препаратах, что проявлялось в достоверном уменьшении коэффициентов АРД и МРД соответственно с $0,77 \pm 0,02$ и $0,85 \pm 0,02$ в контроле до $0,68 \pm 0,02$ и $0,59 \pm 0,07$ в подопытной группе ($p < 0,05$) (рис. 4).

В соответствии с полученными данными, спустя 40 суток после облучения, происходило снижение показателя $\text{СД}_{\text{днф}}$ с $1,33 \pm 0,08$ (контроль) до

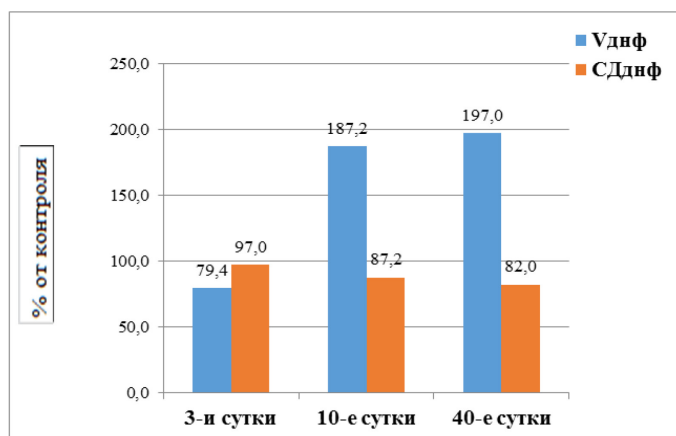


Рисунок 5. Влияние 2,4-ДНФ на поглощение кислорода в семенниках крыс в % по отношению к контролю после однократного γ -облучения (1,0 Гр)

Figure 5. The effect of 2,4-DNP on oxygen uptake in rat testes as a percentage relative to the control after a single γ -irradiation (1.0 Gy)

$1,09 \pm 0,02$ (на 11,5 %) ($p < 0,001$), что всё ещё позволяло констатировать присутствие разобщения в системе окисления и фосфорилирования (рис. 5).

Однако через 10 суток коэффициент $\text{СД}_{\text{як}}$ уменьшался на 25,9 % ($p < 0,05$) и, забегая вперёд, оставался достоверно сниженным вплоть до завершения эксперимента, т.е. до 40-х суток наблюдения. Интересно отметить, что $\text{СД}_{\text{глу}}$ после облучения животных в дозе 1,0 Гр практически не изменялся ни через 3, ни через 10 суток наблюдения (рис. 2).

Обсуждение

Как известно, процесс поглощения кислорода в митохондриях сперматозоидов разъясняет метаболическую картину и функциональное состояние мужской репродуктивной системы. Так, уменьшение или повышение потребления кислорода в тестику-

лярных тканях приводит к нарушению энергетического баланса мужской половой системы и, соответственно, к изменению морфофункциональной характеристики семенников.

Окислительный стресс играет важную роль в развитии и прогрессировании метаболизма сперматозоидов. Митохондрии являются наиболее важными источниками активных форм кислорода в сперматозоидах [10, 11, 15]. Нарушения метаболизма субстратов в мужской репродуктивной системе вызывают адаптацию и дисфункцию митохондрий, проявляющихся в несоответствии между окислением жирных кислот в митохондриях и активностью цепи переноса электронов (ЭТЦ), что способствует выработке АФК в компонентах ЭТЦ. Кроме того, другие источники митохондриальных АФК, полученные как продукты метаболических путей, таких как β -окисление жирных кислот, также могут продуцировать значительное количество АФК с вовлечением их в метаболизм сперматозоида [12, 14, 15]. Повышенная выработка АФК сперматозоидами может вызывать различные эффекты, включая сбой программирования метаболизма энергетических субстратов в мужской репродуктивной системе, модуляцию метаболического воспаления, окислительно-восстановительную модификацию ионных каналов и транспортеров, а также апоптоз сперма-

тозоидов, что, в конечном итоге, приводит к структурным и функциональным изменениям семенников [3, 12]. Основываясь на вышеуказанных механистических взглядах, в настоящем обзоре обобщено современное понимание механизмов, лежащих в основе метаболизма сперматозоидов с акцентом на роль окислительного стресса [10, 11, 12].

Заключение

Окислительные процессы в сперматозоидах чувствительны к внешнему γ -облучению при дозе 1,0 Гр. Воздействие однократного γ -облучения на показатели поглощения кислорода выражается в ингибирующем влиянии на 3-и сутки, которое сменяется стимулирующим действием на 10-е и 40-е сутки.

Выявлен эффект снижения потребления кислорода при окислении сукцината и глутамат натрия, а также в присутствии малоновой кислоты и 2,4-динитрофенола через 3-е суток после облучения крыс.

На 10-е сутки потребление кислорода увеличилось сперматозоидами в 2 раза в результате окисления эндогенных субстратов, сукцината натрия, глутамата натрия с сохранением этого эффекта в присутствии ингибиторов дыхания и 2,4-динитрофенола на протяжении 40-суточного наблюдения.

Литература [References]

- 1 Аль Меселмани М.А., Шабанов, П.Д. Морфофункциональное состояние семенников в условиях радиационного воздействия. *Экологический Вестник*. 2014;27 (1):45-50. Al meselmani, M.A, Shabanov, P.D. Morfofunkcional'noe sostojanie semennikov v uslovijah radiacionnogo vozdejstvija [Morphofunctional condition of testis in conditions of radiation exposure]. *Ecological Bulletin*. 2014; 27 (1): 45-50. (In Russ).
- 2 Аль Меселмани М.А. Показатели поглощения кислорода в тканях семенников под воздействием инкорпорации ^{137}CS . *Прикладные информационные аспекты медицины: научно-практический журнал*. 2023;26 (2): 92-100. Al Meselmani M.A. Pokazateli pogloshhenija kisloroda v tkanjah semennikov pod vozdejstviem inkorporacii ^{137}cs [Indicators of oxygen absorption in testicular tissues under the influence of incorporation ^{137}cs]. *Applied Information Aspects of Medicine*. 2023;26(2):92-100. (In Russ). <https://doi.org/10.18499/2070-9277-2023-26-2-92-100>
- 3 Lixin Qi, Jiaxuan Li, Wei Le, Jinfu Zhang. Low-dose ionizing irradiation triggers apoptosis of undifferentiated spermatogonia in vivo and in vitro. *Transl Androl Urol*. 2019;8(6): 591-600. <https://doi.org/10.21037/tau.2019.10.16>
- 4 Мамина В.П. Радиопротекторный эффект эраконда на сперматогенез при воздействии однократного внешнего острого γ -облучения. *Радиационная биология*. 2022;67(5):18-23. Mamina V.P. Radioprotekturnyj jeffekt jerakonda na spermatogenez pri vozdejstvii odnokratnogo vneshnego ostrogo γ -obluchenija [Radioprotective Effect of the Eracond on Spermatogenesis Under the Influence of a Single External Acute γ -Irradiation]. *Radiation biology*. 2022;67(5):18-23. (In Russ). <https://doi.org/10.33266/1024-6177-2022-67-5-18-23>
- 5 Shin E, Lee S, Kang H, Kim J, Kim K, Youn H, Jin YW, Seo S and Youn B (2020) Organ-Specific Effects of Low Dose Radiation Exposure: A Comprehensive Review. *Front. Genet*. 11:566244. <https://doi.org/10.3389/fgene.2020.566244>
- 6 Mortezaee K., Motallebzadeh E., Milajerdi A., Farhood B., Najafi M., Sahebkar A. The Effect of Prostate Cancer Radiotherapy on Testosterone Level: A Systematic Review and Meta-analysis Meta-Analysis. *Anticancer Agents Med Chem*. 2020;20(6):636-642. <https://doi.org/10.2174/1871520620666200128112558>
- 7 Hoa Thi Kim Nguyen, Michael A Terao, Daniel M Green, Ching-Hon Pui, Hiroto Inaba. Testicular involvement of acute lymphoblastic leukemia in children and adolescents: Diagnosis, biology, and management. *Cancer*. 2021;127(17):3067-3081. <https://doi.org/10.1002/cncr.33609>
- 8 Delessard M, Saulnier J, Rives A, Dumont L, Rondanino C, Rives N. Exposure to Chemotherapy During Childhood or Adulthood and Consequences on Spermatogenesis and Male Fertility. *Int J Mol Sci*. 2020 ;21(4):1454. <https://doi.org/10.3390/ijms21041454>
- 9 Ricardo Silva, David F. Carrageta, Marco G. Alves, Pedro F. Oliveira. Testicular Glycogen Metabolism: An Overlooked Source of Energy for Spermatogenesis?. *BioChem*. 2022;2(3):198-214. <https://doi.org/10.3390/biochem2030014>
- 10 Baskaran S., Finelli R., Agarwal A., Henkel R. Reactive oxygen species in male reproduction: A boon or a bane? *Andrologia*. 2020;53(1):e13577. <https://doi.org/10.1111/and.13577>
- 11 Lizbeth J-R, Fahiel C, Alma L, Miguel B, M M O, Socorro R-M. Physiological role of reactive oxygen species in testis and epididymal spermatozoa. *Andrologia*. 2022;54(4):e14367. <https://doi.org/10.1111/and.14367>
- 12 Barati E., Nikzad H., Karimian M. Oxidative stress and male infertility: Current knowledge of pathophysiology and role of antioxidant therapy in disease management. *Cellular and Molecular Life Sciences*. 2020;77(1):93-113. <https://doi.org/10.1007/s00018-019-03253-8>
- 13 Франк Г.М., Кондрашова М.Н., Ананенко А.А. Руководство по изучению биологического окисления полярографическим методом. 1973;106-119. Frank G.M., Kondrashova M.N., Ananenkov A.A. Rukovodstvo po izucheniyu biologicheskogo okisleniya polyarograficheskim me-todom. 1973;106-119. (In Russ).

- 14 Грицук, Н.А, Конопля, Е.Ф, Грицук, А.И. Влияние инкорпорации ^{137}Cs на показатели митохондриального окисления миокарда и динамику электрокардиографических параметров у крыс. *Весті Нацыянальнай Акадэміі навук Беларусі. Серыя медыцынскіх навук.* 2008;2:105-110. Gritsuk, N.A, Konoplya, E.F, Gritsuk, A.I. Vliyanie inkorporatsii ^{137}Cs na pokazateli mitokhondrial'nogo okisleniya miokarda i dinamiku elektrokardiograficheskikh parametrov u kryss. *Vestsi Natsyyanal'nay Akademii navuk Belarusi. Seryya medytsynskikh navuk.* 2008;2:105-110. (In Russ).
- 15 Casey L Quinlan, Irina V Perevoshchikova, Martin Hey-Mogensen, Adam L Orr, Martin D Brand. Sites of reactive oxygen species generation by mitochondria oxidizing different substrates. *Redox Biol.* 2013;1(1):304-12. <https://doi.org/10.1016/j.redox.2013.04.005>

Авторская справка**Аль Меселмани Моханад Али**

Канд. биол. наук, доцент кафедры биохимии и биоинформатики, Полесский государственный университет.

ORCID 0009-0000-0188-9006; Author ID: 1200106;

al-meselmani.m@polessu.by

Вклад автора: разработка концепции и дизайна исследования, сбор и обработка материала, написание текста.

Author's reference**Mohanad Ali Al Meselmani**

Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor of the Department of Biochemistry and Bioinformatics, Polesky State University.

ORCID 0009-0000-0188-9006; Author ID: 1200106;

al-meselmani.m@polessu.by

Author's contribution: development of the concept and design of the study, collection and processing of material, writing the text.