

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВОБОДНОРАДИКАЛЬНЫХ РЕАКЦИЙ В ЦЕЛЬНОЙ КРОВИ КРЫС WISTAR ПРИ СТРЕСС-ИНДУЦИРОВАННОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ

О.А. Пузикова

аспирант, Институт биологии, Тюменский государственный университет (г. Тюмень, Россия)

E-mail: olga.puzikova1997@yandex.ru; ORCID: 0000-0003-4107-990X

И.В. Ральченко

д.б.н., профессор, кафедра анатомии и физиологии человека и животных, Тюменский государственный университет;

профессор, кафедра биохимии, Тюменский государственный медицинский университет Минздрава России (г. Тюмень, Россия)

E-mail: ralchenko-i@mail.ru; ORCID: 0000-0002-4375-078X

Цель исследования – определение свободнорадикальных реакций в цельной крови крыс Wistar при стресс-индуцированной физической нагрузке.

Материал и методы. Объект исследования – цельная кровь крыс-самцов Wistar. Крыс из опытной группы подвергли принудительному плаванию в аквариуме. Эксперимент проводился по Порсольту при температуре воды 25 °С. Время плавания 40 мин определено экспериментальным путем после моделирования стресса. С помощью спонтанной люминол-зависимой хемилюминесценции на биохемилюминетре БХЛМ 3606М определяли значения максимума интенсивности свечения (I_{\max}) и скорости его роста (Ltg). Скорость свободнорадикальной реакции вычисляли по формуле, описанной Ю.А. Владимировым с соавт. (2011).

Результаты. При стресс-индуцированной физической нагрузке значение I_{\max} достоверно увеличивается в 1,09 раза ($p < 0,05$), а значение Ltg достоверно снижается в 4,65 раза ($p < 0,05$). Между указанными параметрами наблюдается линейная зависимость, описанная уравнением $I_{\max} = 128,411 \cdot \text{Ltg}$, где 128,411 – коэффициент, характеризующий чувствительность анализатора БХЛМ 3606М к излучению фотоэлектронного умножителя. С помощью этого уравнения установлены константы скоростей изученных свободнорадикальных реакций: константа первой реакции $k_1 = 1 \cdot 10^{10} \text{ (моль/дм}^3\text{)}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, которая является константой скорости образования пероксинитрита, константа второй реакции $k_2 = 3,2 \cdot 10^7 \text{ (моль/дм}^3\text{)}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ – константа скорости восстановления глутатион-тильного радикала до восстановленной формы глутатиона.

Выводы. При стресс-индуцированной физической нагрузке наблюдаются реакция образования пероксинитрита из радикала монооксида азота, а также реакция восстановления глутатион-тильного радикала до восстановленной формы глутатиона. Впервые свободнорадикальные реакции, имеющие место при стресс-индуцированной физической нагрузке, определены с помощью зависимости скорости свечения от соотношения максимума интенсивности хемилюминесценции к коэффициенту, характеризующему чувствительность анализатора БХЛМ 3606М к излучению фотоэлектронного умножителя. Впервые уравнение, описанное Ю.А. Владимировым с соавт. (2011), использовано при исследовании свободнорадикальных реакций с помощью анализаторов БХЛМ 360*. В процессе хемилюминесцентного исследования изучаемые вещества не разрушаются, вследствие чего ход реакций не изменяется. Кроме того, хемилюминесценция обладает высокой чувствительностью, что весьма важно при регистрации высокорационных радикалов.

Ключевые слова: свободнорадикальные реакции, стресс, физические нагрузки, хемилюминесценция, константа скорости реакции, пероксинитрит, монооксид азота, глутатион-тильный радикал, глутатион.

Для цитирования: Пузикова О.А., Ральченко И.В. Определение свободнорадикальных реакций в цельной крови крыс Wistar при стресс-индуцированной физической нагрузке. Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии. 2022;25(1):50–54. <https://doi.org/10.29296/25877313-2022-01-08>

Свободные радикалы – это химические частицы, которые в умеренных количествах участвуют в различных клеточных процессах (например, в защите организма от патогенных микроорганизмов), а в избытке повреждают клетки [1]. Избыток активных форм кислорода (АФК), повреждающих молекулы дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК), белков и липидов, наблюдается при стрессе [2].

Один из видов стресса, с которым сталкивается человек, индуцируется физическими нагрузками. Особенности генерации свободных радикалов и работы антиоксидантной системы при физических нагрузках зависят от их вида, интенсивности, длительности и систематичности [3].

Активность ферментов антиоксидантной системы и количество продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ) при физических нагрузках

активно изучены, однако исследований по кинетике свободнорадикальных реакций практически нет. Её можно изучить с помощью хемилюминесценции – свечения, сопровождающего химические реакции [4, 5]. Особенность данного метода заключается в том, что при исследовании изучаемые вещества не разрушаются и ход реакций не изменяется. Кроме того, хемилюминесценция обладает высокой чувствительностью, что весьма важно при обнаружении высокореакционных радикалов [4].

Цель исследования – определение свободнорадикальных реакций в цельной крови крыс Wistar при стресс-индуцированной физической нагрузке.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В исследование было включено 30 крыс-самцов Wistar массой 120–140 г. Животных содержали в условиях вивария на полноценной диете (овёс, овощи, минеральные добавки). Перед началом эксперимента животных протестировали по двигательной активности методом «Открытое поле». Крыс разделили на две группы: контрольную группу составили 10 крыс, а опытную – 20. Опытных крыс подвергли принудительному плаванию в аквариуме, время плавания 40 мин при температуре воды 25 °С по Порсольту [6]. Время плавания определено экспериментальным путем после моделирования стресса. После декапитации кровь для исследования забирали в гепаринизированные капилляры. Далее 75 мм³ крови вносили в кювету с 2 см³ активатора (вещества, усиливающего хемилюминесценцию (ХЛ)) – люминола (Beckman Coulter, Чехия) в физиологическом растворе NaCl 0,9 моль-экв/дм³ в барабан биохемилюминометра БХЛМ 3606М (СКТБ «Наука» КНЦ СО РАН, Россия) [4, 5]. В качестве контроля для измерения фонового свечения, постоянно присутствующего в окружающей среде, использовали раствор люминола в физиологическом растворе 0,9 моль-экв/дм³ NaCl [5]. В исследовании определяли параметры

спонтанной люминол-зависимой ХЛ крови крыс: максимум интенсивности (I_{\max} , измеряется в относительных единицах (отн. ед.)) и скорость роста свечения (Ltg, измеряется в относительных единицах, деленных на секунду (отн. ед/с)) [7]. По графику зависимости интенсивности свечения от времени определяли значения I_{\max} и Ltg за 10 мин [5].

Экспериментальный материал обрабатывали с помощью программ Statistica 6.0 (StatSoft, США) и Microsoft Excel 365 (Microsoft, США). Соответствие распределений нормальному типу проверяли по критерию Пирсона. Достоверность отличий между группами определяли по критерию Манна–Уитни и по t -критерию Стьюдента. Наличие линейной зависимости I_{\max} от Ltg устанавливали при помощи коэффициента корреляции Пирсона. Теснота линейной связи оценена по шкале Чеддока. Тип корреляции проверен с помощью метода наименьших квадратов. Скорость свободнорадикальной реакции вычисляли по формуле, описанной Ю.А. Владимировым с соавт. (2011):

$$I_{CL} = K \cdot k_{\text{реакции}} \cdot [R\cdot],$$

где I_{CL} – интенсивность ХЛ, отн. ед.; K – коэффициент, характеризующий чувствительность биохемилюминометра БХЛМ 3606М к излучению фотоэлектронного умножителя; $k_{\text{реакции}}$ – константа скорости реакции, (моль/дм³)⁻¹·с⁻¹; $[R\cdot]$ – равновесная концентрация свободных радикалов, моль/дм³.

Выражение $k_{\text{реакции}} \cdot [R\cdot]$ равно скорости реакции [8]. Поскольку скорость роста свечения равна Ltg, а в качестве интенсивности свечения принимали максимум интенсивности ХЛ (I_{\max}), то максимум интенсивности свечения вычисляли по формуле: $I_{\max} = K \cdot Ltg$, где I_{\max} , K , Ltg – описано выше.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Значения параметров свечения цельной крови у крыс из контрольной и опытной групп приведены в таблице.

Таблица. Сравнение параметров спонтанной люминол-зависимой хемилюминесценции цельной крови крыс Wistar между контрольной группой и группой, подвергнувшейся физическим нагрузкам

Показатель	Контрольная группа ($M \pm m$)	Группа, подвергнувшаяся физическим нагрузкам ($M \pm m$)
I_{\max} , отн. ед.	1675,90±16,03	1823,29±80,83*
Ltg, отн. ед/с	4,081±1,301	0,878±0,618*

Примечание: I_{\max} – максимум интенсивности хемилюминесценции (ХЛ); Ltg – тангенс угла между значениями начальной интенсивности ХЛ и максимальной интенсивности свечения; * – достоверные отличия опытных значений от контрольных, $p < 0,05$.

Установлено, что при стресс-индуцированной физической нагрузке значение I_{\max} достоверно увеличивается в 1,09 раза. Кроме того, такая нагрузка сопровождается статистически достоверным снижением значения Ltg в 4,65 раза.

В контрольной выборке значение коэффициента корреляции Пирсона равно $-0,3$. По шкале Чеддока линейная связь является умеренной. Зависимость I_{\max} от Ltg у крыс из контрольной группы описывается уравнением $I_{\max} = -128,935 \cdot \text{Ltg} + 2577,008$. Модуль коэффициента K равен 128,935.

В опытной выборке значение коэффициента корреляции Пирсона равно 0,1. По шкале Чеддока линейная связь является слабой. Зависимость I_{\max} от Ltg у крыс из опытной группы описывается уравнением $I_{\max} = 127,887 \cdot \text{Ltg} + 1616,268$. Модуль коэффициента K равен 127,887.

Исходя из вышеуказанных уравнений и вычисленного среднего арифметического модулей K, мы сделали вывод о том, что модуль коэффициента чувствительности биохемиллюминометра БХЛМ 3606М равен 128,411. Таким образом, для исследования будет использоваться уравнение $I_{\max} = 128,411 \cdot \text{Ltg}$. Так как в вышеуказанной формуле единственным параметром, который не изменяется, является константа скорости свободнорадикальной реакции, то для определения последней необходимо определить тип зависимости между Ltg и $I_{\max}/128,411$, а также предположить, что $[R\cdot]$ равно Ltg. Для начала выявлена зависимость между $I_{\max}/128,411$ и $[R\cdot]$ у контрольной выборки. Получили уравнение $I_{\max}/128,411 = -12,933[R\cdot]^2 + 110,05[R\cdot] - 200,26$. Коэффициент a (из типичного уравнения квадратичной зависимости $y = ax^2 + bx + c$), модуль которого (согласно указанному уравнению) является произведением констант скоростей двух реакций, равен $-12,933$. По этому значению можно сделать вывод о том, что одна из реакций относится к реакциям образования нового вещества, а другая – к реакциям разложения.

Общая концентрация свободных радикалов вычисляется по формуле $[R\cdot] = \frac{I_{\max}}{128,41\text{Ltg}}$. Тогда

$$[R\cdot] = \frac{1675,90/128,41}{4,08} = 3,20 \frac{\text{моль}}{\text{дм}^3} \cdot 10^{-x},$$

где x – степень, в которую возводятся моли, деленные на кубические дециметры.

Исходя из результатов вычислений предположим, что концентрация свободного радикала в

крови крыс, подвергнувшихся физической нагрузке, может быть равна либо $3,20 \text{ мкмоль/дм}^3$, либо $3,20 \text{ нмоль/дм}^3$.

Если допустим, что концентрация вещества измеряется в наномолях, и умножим $(\text{моль/дм}^3)^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ на 10^{-9} , то получим, что одна константа имеет значение, близкое к $1 \cdot 10^9 (\text{нмоль/дм}^3)^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, а другая – близкое к $1 \cdot 10^{10} (\text{нмоль/дм}^3)^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$.

Выводим следующие гипотезы:

1. Концентрация радикалов равна $3,20 \text{ нмоль/дм}^3$, и при физической нагрузке имеют место реакции с участием радикала монооксида азота. Теоретические константы реакций с участием $\cdot\text{NO}$ равны: $1 \cdot 10^{10} (\text{моль/дм}^3)^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ при взаимодействии с супероксидным анион-радикалом, $1 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^3 (\text{моль/дм}^3)^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ при взаимодействии с глутатионом [9].

2. Концентрация радикалов равна $3,20 \text{ мкмоль/дм}^3$, и при физической нагрузке имеет место реакция взаимодействия пероксида водорода с каталазой, глутатионпероксидазой и перокси-редоксинами. Теоретическая константа скорости реакции равна $1 \cdot 10^7 - 1 \cdot 10^8 (\text{моль/дм}^3)^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ [9].

Гипотеза о реакции с участием H_2O_2 отвергается, так как константа её скорости меньше предположенных значений. Рассмотрим константы скоростей реакции с участием $\cdot\text{NO}$. Ближе к предположенному значению находится значение константы скорости реакции взаимодействия радикала монооксида азота с супероксидным анион-радикалом. В.Р. Watts с соавт. (1995) показали, что пероксинитрит дает свечение при взаимодействии с белками [4].

В опытной выборке зависимость $I_{\max}/128,411$ описывается уравнением

$$\frac{I_{\max}}{128,411} = -0,4113[R\cdot]^2 + 2,7964[R\cdot] + 11,614.$$

Константа второй реакции, характерной для стресс-индуцированной физической нагрузки, равна

$$k_2 = \frac{a_{\text{опытный}}}{a_{\text{контрольный}}} = \frac{|-0,4113|}{|-12,933|} = 3,2 \cdot 10^7 \left(\frac{\text{нмоль}}{\text{дм}^3} \right)^{-1} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Полагаем, что при стресс-индуцированной физической нагрузке имеет место реакция образования восстановленной формы глутатиона в результате отщепления водорода из арахидоновой

кислоты молекулами глутатион-тильного радикала (теоретическая константа скорости реакции равна $3,1 \cdot 10^7$ (моль/дм³)⁻¹·с⁻¹) [10]. При этом уровень восстановленного глутатиона может быть связан как с интенсивностью физической нагрузки, так и с особенностями их нутритивного статуса [11]. Возможно, участие арахидоновой кислоты в образовании глутатиона обусловлено интенсивностью физических нагрузок. В.И. Сергиенко с соавт. (2019) установили, что при физических нагрузках, в частности при острых, увеличивается количество АФК, которые являются модуляторами активности тромбоцитов [12]. От мембран тромбоцитов отщепляется арахидоновая кислота в избытке. Она активирует циклооксигеназный путь своего окисления, которое сопровождается образованием супероксидного анион-радикала из кислорода [3, 13].

ВЫВОДЫ

Установлено, что спонтанное люминол-зависимое свечение крови при стресс-индуцированной физической нагрузке определяется пероксинитритом, образующимся в результате соединения супероксидного анион-радикала с радикалом монооксида азота, и глутатион-тильным радикалом, который отщепляет водород у арахидоновой кислоты и восстанавливается до восстановленной формы глутатиона.

Научная новизна исследования состоит в том, что впервые свободнорадикальные реакции, имеющие место при стресс-индуцированной физической нагрузке, определены с помощью зависимости скорости свечения от соотношения максимума интенсивности хемилюминесценции к коэффициенту, характеризующему чувствительность биохемилуминометра БХЛМ 3606М к излучению фотоэлектронного умножителя. Кроме того, уравнение, описанное Ю.А. Владимировым с соавт. (2011), впервые использовано при исследовании свободнорадикальных реакций с помощью анализаторов серии БХЛМ 360*.

Преимущество исследования заключается в том, что в его процессе изучаемые вещества не претерпевают разрушения, вследствие чего изменения хода реакций не происходит. Необходимо также отметить, что хемилюминесценция характеризуется высокой чувствительностью, что является

ся весьма важным при регистрации высокорезонансных радикалов.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Шлапакова Т.И., Костин П.К., Тягунова Е.Е. Активные формы кислорода: участие в клеточных процессах и развитии патологии. Биоорганическая химия. 2020; 46(5): 466–485.
- 2 Sharma P., Jha A.B., Dubey R.S. et al. Reactive Oxygen Species, Oxidative Damage, and Antioxidative Defense Mechanism in Plants under Stressful Conditions. Journal of Botany. 2012; Article ID 217037. 26 p.
- 3 Григорьева Н.М. Использование антиоксидантов в спортивной практике. Научно спортивный вестник Урала и Сибири. 2020; (1): 23–36.
- 4 Владимиров Ю.А., Проскурнина Е.В. Свободные радикалы и клеточная хемилюминесценция. Успехи биологической химии. 2009; 49: 341–88.
- 5 Лыткина Е.Ю. Биохемилюминесцентный анализ крови человека. Лучшие выпускные квалификационные работы 2008 года. Часть 1: Естественно-научное направление. Тюмень: изд-во Тюменского государственного университета, 2009; 166–75.
- 6 Porsolt R.D., le Pichon M., Jalfre M. Depression: a new animal model sensitive to antidepressant treatments. Nature. 1977; 266: 730–732.
- 7 Савченко А.А. Гринштейн Ю.И., Дробышева А.С. Особенности метаболического обеспечения респираторного взрыва нейтрофилов крови и мокроты у больных внебольничной пневмонией. Пульмонология. 2019; 29(2): 167–74.
- 8 Владимиров Ю.А., Проскурнина Е.В., Измайлов Д.Ю. Кинетическая хемилюминесценция как метод изучения реакций свободных радикалов. Биофизика. 2011; 56(6): 1081–90.
- 9 Nikolaidis M.G., Margaritelis N.V., Matsakas A. Quantitative Redox Biology of Exercise. Int. J. Sports Med. 2020; 41(10): 633–45.
- 10 Schöneich C., Asmus K.D. Reaction of thiyl radicals with alcohols, ethers and polyunsaturated fatty acids: A possible role of thiyl free radicals in thiol mutagenesis? Radiat. Environ. Biophys. 1990; 29(4): 263–71.
- 11 Колесов С.А., Рахманов П.С., Блинова Т.В. и др. Особенности функционирования системы глутатиона при физических нагрузках и влияние на нее алиментарных факторов. Спортивная медицина: наука и практика. 2017; 7(2): 39–45.
- 12 Сергиенко В.И., Кантюков С.А., Ермолаева Е.Н. и др. Хемилюминесценция тромбоцитов при физических нагрузках разной интенсивности. Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2019; 167(6): 686–9.
- 13 Ральченко И.В., Зарубина И.А. Изменение метаболизма арахидоновой кислоты в клетках и их влияние на активность тромбоцитов. Успехи современного естествознания. 2008; (6): 54.

Поступила после доработки 8 декабря 2021 г.

DETERMINATION OF THE FREE RADICAL REACTIONS IN WHOLE BLOOD OF WISTAR RATS UNDER STRESS-INDUCED PHYSICAL EXERCISE

© O.A. Puzikova, I.V. Ralchenko, 2022

O.A. Puzikova

Post-graduate Student, Institute of Biology, University of Tyumen (Tyumen, Russia)

E-mail: olga.puzikova1997@yandex.ru; ORCID: 0000-0003-4107-990X

I.V. Ralchenko

Dr.Sc. (Biol.), Professor, Department of Human and Animal Anatomy and Physiology, University of Tyumen;

Professor, Department of Biochemistry, Tyumen State Medical University Ministry of Health of Russia (Tyumen, Russia)

E-mail: ralchenko-i@mail.ru; ORCID: 0000-0002-4375-078X

Purpose. Determination of the free radical reactions in whole blood of Wistar rats under stress-induced physical exercise.

Materials and methods. The object of the research is whole blood of male Wistar rats. Rats in the experimental group were forced to swim in an aquarium (swimming time 40 minutes at the water temperature of 25 °C with using of Porsolt test). The swimming time was determined experimentally after the stress modeling. The values of maximum luminescence intensity (I_{max}) and its growth rate (L_{tg}) were determined with spontaneous luminol-dependent chemiluminescence on BCLM 3606M biochemiluminometer. The rate of the free radical reaction was calculated by using the formula described by Yu.A. Vladimirov et al. (2011).

Results. During stress-induced physical exercise I_{max} value significantly increases by 1.09 times ($p < 0.05$) and L_{tg} value significantly decreases by 4.65 times ($p < 0.05$). Between the above-noted parameters the linear dependence described with the equation $I_{max} = 128.411 \cdot L_{tg}$ where 128.411 is the coefficient characterizing BCLM 3606M analyzer's sensitivity to radiation of a photomultiplier tube is observed. The rate constants of the studied free radical reactions were established with this equation: the constant of the first reaction $k_1 = 1 \cdot 10^{10} \text{ (mol/dm}^3\text{)}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ is the constant of peroxyxynitrite formation rate, the constant of the second reaction $k_2 = 3.2 \cdot 10^7 \text{ (mol/dm}^3\text{)}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ is the constant of the rate of reduction of glutathione-thiyl radical to reduced form of glutathione.

Conclusions. As a result of our study, it was found that there is the reaction of formation of peroxyxynitrite from radical of nitrogen monoxide and the reaction of reduction of glutathione-thiyl radical to reduced form of glutathione during stress-induced physical exercise. For the first time free radical reactions during stress-induced physical exercise were determined with the dependence of luminescence rate on ratio of maximum chemiluminescence intensity to the coefficient characterizing BCLM 3606M analyzer sensitivity to radiation of a photomultiplier tube. For the first time the equation described by Yu.A. Vladimirov et al. (2011) used in study of free radical reactions using BCLM 360* analyzers. In the process of chemiluminescence substances are not destroyed, therefore a reaction path doesn't change. In addition, chemiluminescence is highly sensitive, which is very important when registering highly reactive radicals.

Key words: free radical reactions, stress, physical exercise, chemiluminescence, reaction rate constant, peroxyxynitrite, nitrogen monoxide, glutathione-thiyl radical, glutathione.

For citation: Puzikova O.A., Ralchenko I.V. Determination of the free radical reactions in whole blood of Wistar rats under stress-induced physical exercise. Problems of biological, medical and pharmaceutical chemistry. 2022;25(1):50-54. <https://doi.org/10.29296/25877313-2022-01-08>

REFERENCES

- Shlapakova T.I., Kostin R.K., Tjagunova E.E. Aktivnye formy kisloroda: uchastie v kletочnyh processah i razvitii patologii. Bioorganicheskaja himija. 2020; 46(5): 466-485.
- Sharma P., Jha A.B., Dubey R.S. et al. Reactive Oxygen Species, Oxidative Damage, and Antioxidative Defense Mechanism in Plants under Stressful Conditions. Journal of Botany. 2012; Article ID 217037. 26 p.
- Grigor'eva N.M. Ispol'zovanie antioksidantov v sportivnoj praktike. Nauchno sportivnyj vestnik Urala i Sibiri. 2020; (1): 23-36.
- Vladimirov Ju.A., Proskurnina E.V. Svobodnye radikaly i kletочnaja hemiljuminescencija. Uspehi biologicheskoi himii. 2009; 49: 341-88.
- Lytkina E.Ju. Biohemiljuminescentnyj analiz krovi cheloveka. Luchshie vypusknnye kvalifikacionnye raboty 2008 goda. Chast' 1: Estestvenno-nauchnoe napravlenie. Tjumen': izd-vo Tjumenskogo gosudarstvennogo universiteta, 2009; 166-75.
- Porsolt R.D., le Pichon M., Jalfre M. Depression: a new animal model sensitive to antidepressant treatments. Nature. 1977; 266: 730-732.
- Savchenko A.A., Grinshtejn Ju.I., Drobysheva A.S. Osobennosti metabolicheskogo obespechenija respiratornogo vzryva nejtrofilov krovi i mokroty u bol'nyh vnebol'nichnoj pnevmoniej. Pul'monologija. 2019; 29(2): 167-74.
- Vladimirov Ju.A., Ppockupnina E.V., Izmajlov D.Ju. Kineticheskaja hemiljuminescencija kak metod izuchenija reakcij svobodnyx padikalov. Biofizika. 2011; 56(6): 1081-90.
- Nikolaidis M.G., Margaritelis N.V., Matsakas A. Quantitative Redox Biology of Exercise. Int. J. Sports Med. 2020; 41(10): 633-45.
- Schöneich C., Asmus K.D. Reaction of thiyl radicals with alcohols, ethers and polyunsaturated fatty acids: A possible role of thiyl free radicals in thiol mutagenesis? Radiat. Environ. Biophys. 1990; 29(4): 263-71.
- Kolesov S.A., Rahmanov R.S., Blinova T.V. i dr. Osobennosti funkcionirovaniya sistemy glutaciona pri fizicheskikh nagruzkah i vlijanie na nee alimentarnyh faktorov. Sportivnaja medicina: nauka i praktika. 2017; 7(2): 39-45.
- Sergienko V.I., Kantjukov S.A., Ermolaeva E.N. i dr. Hemiljuminescencija trombocitov pri fizicheskikh nagruzkah raznoj intensivnosti. Bjulleten' jeksperimental'noj biologii i mediciny. 2019; 167(6): 686-9.
- Ralchenko I.V., Zarubina I.A. Izmenenie metabolizma arahidonovoi kisloty v kletkah i ih vlijanie na aktivnost' trombocitov. Uspehi sovremennogo estestvoznaniya. 2008; (6): 54.