

5. Черников Ф.Р. Сверхмедленные колебания светорассеяния в жидкостях разного типа. *Биофизика*, 1990, т. 35, № 5, с. 711-715. [Chernikov F.R. Superslow fluctuations of light scattering in liquids of different types. *Biofizika*, 1990, vol. 35, no. 5, pp. 711-715. (In Russ.)]
6. Дроздов А.В., Нагорская Т.П. Квазипериодический характер межмолекулярных взаимодействий в воде. *Биофизика*, 2014, т. 59, № 6, с. 1195-1208. [Drozdov A.V., Nagorskaya T.P. Quasiperiodic character of intermolecular interactions in water. *Biofizika*, 2014, vol. 59, no. 6, pp. 1195-1208. (In Russ.)]
7. Шаталов В.М., Филиппов А.Э., Нога И.В. Пузырьковая природа флуктуаций некоторых свойств водных растворов. *Биофизика*, 2012, т. 57, № 4, с. 565-572. [Shatalov V.M., Filippov A.E., Noga I.V. Bubble nature of fluctuations of certain properties of aqueous solutions. *Biofizika*, 2012, vol. 57, no. 4, pp. 565-572. (In Russ.)]
8. Deegan R.D., Bakajin O., Dupont T.F. [et al.] Contact line deposits in an evaporating drop. *Phys. Rev. E*, 2000, vol. 62, pp. 756-765.
9. Yakhno T., Sanin A., Pelyushenko A. [et al.] Uncoated quartz resonator as a universal biosensor. *Biosensors and Bioelectronics*, 2007, vol. 22, no. 9-10, pp. 2127-2131.
10. Яхно Т. *Кровь как полидисперсная система*. Lambert Academic Publishing GmbH & Co, Germany, 2011, 313 с. [Yakhno T. *Blood as a polydisperse system*. Lambert Academic Publishing GmbH & Co, Germany, 2011, 313 p. (In Russ.)]
11. Мищук Н.А. Теоретические проблемы устойчивости броуновских дисперсных систем. *Химия и технология воды*, 2011, т. 33, № 4, с. 353-366. [Mischuk N.A. Theoretical problems of Brownian stability of disperse systems. *Chemistry and technology of water*, 2011, vol. 33, no. 4, pp. 353-366. (In Russ.)]

ПЛОТНОСТЬ КАПИЛЛЯРНОЙ СЕТИ И ДИФфуЗИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СКЕЛЕТНЫХ МЫШЦ ДОННЫХ И ПЕЛАГИЧЕСКИХ МОРСКИХ РЫБ

Солдатов А.А.^{1,2}, Парфенова И.А.²

¹ФГБУН «Институт морских биологических исследований им. А.О. Ковалевского РАН»

пр. Нахимова, 2, г. Севастополь, 299011, РФ

e-mail: alekssoldatov@yandex.ru

²ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, РФ

Аннотация. Исследовали плотность капиллярной сети (N_{ct}), геометрические характеристики сосудов микроциркуляторного русла (длина – l , радиус – d) и химический состав (содержание липидов и воды) белых мышц (*musculus lateralis magnus*) морских рыб. Объектами исследования являлись два вида пелагических (кефаль-сингиль, *Liza aurata*; ставрида, *Trachurus mediterraneus*) и два вида донных (бычок-мартовик, *Gobius batrachocephalus*, скорпена, *Scorpaena porcus*) рыб. У подвижных видов N_{ct} была на 30-40 % выше ($p < 0,001$) и составляла 91-95 капиллярных единиц на 1 мм² поперечного сечения мышцы. Сосуды были короче и мельче: l – 855-876 мкм; d – 3,80-3,85 мкм (подвижные виды) l – 1100-1200 мкм; d – 3,90-3,95 мкм (донные виды). На основании полученных величин были рассчитаны диффузионные пространства в мышцах обеих групп рыб. Диффузионные расстояния (радиус Круга и объем тканевого цилиндра) у пелагических рыб были достоверно ниже ($p < 0,05$), а диффузионная площадь капиллярной сети и поверхностный показатель, напротив, существенно выше ($p < 0,001$). Скелетные мышцы подвижных рыб отличались сравнительно высоким содержанием общих липидов и пониженным уровнем гидратации мышечной ткани. Все выше перечисленное позволяет предположить то, что диффузия кислорода в скелетных мышцах пелагических рыб в сравнении с донными видами должна носить облегченный характер.

Ключевые слова: капиллярная сеть, диффузионные характеристики, скелетные мышцы, донные и пелагические морские рыбы.

THE DENSITY OF THE CAPILLARY NETWORK AND THE DIFFUSION CHARACTERISTICS OF THE SKELETAL MUSCLES OF BENTHIC AND PELAGIC MARINE FISH

Soldatov A.A.^{1,2}, Parfyonova I.A.²

¹ A.O. Kovalevsky Institute of Marine Biological Researches, Russian Academy of Sciences

Nakhimov Ave., 2, Sevastopol, 299011, Russia

e-mail: alekssoldatov@yandex.ru

² Sevastopol State University

Universitetskaya St., 33, Sevastopol, 299053, Russia

Abstract. The density of the capillary network (N_{ct}), the geometric characteristics of the microcirculatory vessels (length – l , radius – d) and chemical composition (total lipid and water) of white muscles (*musculus lateralis magnus*) in marine fishes were investigated. The objects of the study were two pelagic species (golden mullet, *Liza aurata*; horse mackerel, *Trachurus mediterraneus*) and two benthic species (goby, *Gobius batrachocephalus*, fish-scorpion, *Scorpaena porcus*) of fish. The N_{ct} of active species was 30-40 % higher ($p < 0.001$) and accounted for 91-95 capillary units per 1 mm² of the muscle cross-section. The vessels were shorter and smaller: l – 855-876 μ m; d – 3,80-3,85 μ m (mobile species); l – 1100-1200 μ m; d – 3,90-3,95 μ m (benthic species). On the base of the values obtained the diffusion space in

the muscles of both fish groups was calculated. Diffusion distances (the Krogh radius and volume of the tissue cylinder) of pelagic fish were significantly lower ($p < 0.05$), and the diffusion area of the capillary network and surface parameter, on the contrary, significantly higher ($p < 0.001$). Skeletal muscles in active fish had relatively high content of total lipids and reduced level of hydration of the muscle tissue. The results obtained suggest that the oxygen diffusion in skeletal muscle of pelagic fish should be more facilitated in comparison with benthic species.

Key words: capillary network, diffusion characteristics, skeletal muscles, bottom and pelagic marine fish.

Введение.

Пелагические виды морских рыб – это стайные, мигрирующие, оксифильные организмы, метаболизм которых ориентирован на выполнение глобальных аэробных нагрузок [1]. Донные виды, напротив, адаптированы к гипокинезии, существованию в среде с пониженным содержанием кислорода и низкой интенсивности окислительного метаболизма [1]. Сравнение этих групп рыб позволило обнаружить принципиальные отличия в организации и функционировании респираторной, сердечно-сосудистой систем, ряда молекулярных комплексов (гемоглобина, цитохромов) [2-6].

Особый интерес представляет изучение сосудов микроциркуляторного русла. Мышечная композиция пелагических рыб предполагает хорошее развитие красных скелетных мышц, доля которых может достигать 40% [1]. Они обеспечивают в основном крейсерский режим плавания. У донных рыб эта ткань обычно развита крайне слабо [1]. В сравнении с белыми мышцами, красные, помимо значительного содержания миоглобина, отличаются высокой плотностью капиллярной сети, что уменьшает диффузионные расстояния и облегчает доставку кислорода к мышечным волокнам [7, 8]. Адаптация к окислительным нагрузкам предполагает структурные изменения и на уровне белых скелетных мышц. Однако эти аспекты в отношении костистых рыб практически не изучены. Им и посвящено настоящее исследование.

Материал и методы.

Работа выполнена на двух донных: бычок-мартовик (*Gobius batrachocephalus*), скорпена (*Scorpaena porcus*), и двух пелагических: кефаль-сингиль (*Liza aurata*), ставрида (*Trachurus mediterraneus*), видах рыб. После доставки в лабораторию рыбу выдерживали в проточных аквариумах в течение месяца для снятия состояния стресса, вызванного отловом и транспортировкой. В исследованиях использовали только активных питающихся особей. Условия содержания совпадали для всех исследованных видов рыб: температура воды 14-16 °С, концентрация кислорода в воде 7-8 мг л⁻¹, фотопериод 12 часов свет – 12 часов темнота.

За 60-70 минут до отбора проб рыб наркотизировали. В качестве анестезирующего препарата применяли уретан [9]. Его растворяли в воде аквариума, где находились особи. Величины эффективных доз препарата определяли с учетом температуры, солености, концентрации кислорода в воде, экологических и систематических особенностей рыб.

При исследовании микроциркуляторного русла скелетных мышц морских рыб применяли инъекционные и безинъекционные методы. Первые позволяли судить о максимальной плотности капиллярной сети красных и белых мышц, а вторые – о числе функционирующих капиллярных единиц. На основании полученных значений рассчитывали величину капиллярного резерва.

И н ъ е к ц и о н н ы й м е т о д . В работе использовали один из наиболее эффективных инъекционных методов разработанный Огневым [7, 10]. Тушку умерщвленной рыбы помещали в горячую воду на 20-25 минут. Температура – 35-40 °С. Это способствовало максимальному раскрытию сосудов микроциркуляторного русла. Затем через дорсальную аорту (*aorta dorsalis*) при помощи шприца типа “Рекорд” инъецировали горячую 50%-ную водную взвесь туши (температура 35-40°C). Место введения иглы шприца в дорсальную аорту хорошо показано в работе [11]. Инъекцию продолжали до появления туши в крупных венах: *vena cardinales anteriores*, *vena caudalis*.

Затем позади спинного плавника вычленили участки *musculus lateralis magnus*. Их фиксировали в 10%-ном водном растворе нейтрального формалина и рассекали на поперечные и продольные срезы (толщина 25-30 мкм) на замораживающем микротоме. Препараты просветляли в метиловом эфире салициловой кислоты и докрашивали гематоксилин-эозином [10].

На поперечном срезе подсчитывали число капиллярных и мышечных единиц при помощи окулярной сетки, а также определяли их диаметр, используя окуляр-микрометр. На продольных срезах измеряли длину капиллярных единиц.

Б е з и н ъ е к ц и о н н ы й м е т о д . Для выявления числа функционирующих (открытых) капиллярных единиц в скелетных мышцах рыб использовали безинъекционный метод Слонимского [10]. Он основан на реакции циркулирующих эритроцитов с бензидиновым реагентом: 2 г чистого бензидина, 20 мл раствора Рингера, 60 мл дистиллированной воды, 0,5 г активированного угля. Реагент после приготовления встряхивают, фильтруют и хранят без доступа света.

Кусочки *m. lateralis magnus* брали позади спинного плавника и помещали в бензидиновый реагент до появления окраски микрососудов. После этого их переносили в 3%-ный раствор перекиси водорода, а затем в 8 %-ный раствор аммония молибденовокислого, который закрепляет окраску гемоглобина. Далее образцы тканей фиксировали в 80 %-ном этаноле и рассекали на поперечные срезы (толщина 25-30 мкм) на замораживающем микротоме.

На срезах подсчитывали число мышечных и капиллярных единиц, а также измеряли их диаметр.

Р а с ч е т ы . На основании линейных характеристик капиллярной сети были рассчитаны ее диффузионные параметры: радиус Крога (R_k), площадь капиллярной стенки (S), объем тканевого цилиндра (V) и поверхностный показатель ($ПП$). Расчеты проводили по следующим формулам[7]:

$$R_k = \sqrt{\frac{10^6}{N_c \cdot \pi}}; \quad ПП = \frac{N_c}{N_f} \cdot \frac{r}{R_f};$$

$$S = 2 \cdot 10^3 \cdot \pi \cdot r \cdot N_k; \quad V = \pi \cdot R_k^2 \cdot l,$$

где

N_c – число капилляров на 1 мм²;

N_f – число мышечных волокон на 1 мм²;

r – радиус капилляра;

R_f – радиус мышечного волокна;

l – длина капилляра.

В ряде случаев, определяли степень капилляризации мышечной ткани, используя индекс N_c/N_f .

В о д а и л и п и д ы . Суммарное содержание липидов в белых мышцах определяли фотометрически по реакции с фосфованилиновым реагентом [12]. Применяли стандартный набор реактивов фирмы “Lacheme” (Чехия). Экстракцию липидов из мышечной ткани проводили в хлороформ-метанольной смеси [13]. Содержание воды в образцах мышечной ткани определяли по разнице весов исходной и высушенной в термостате при 105 °С до постоянного веса пробы.

Статистическая обработка и графическое оформление полученных результатов проведены с применением стандартного пакета Grapher (версия 7). Результаты представлены в виде $\bar{x} \pm S_x$. Достоверность различий оценивали при помощи t-критерия Стьюдента. О нормальности распределения выборочных совокупностей судили по значениям критерия Пирсона.

Результаты и обсуждение.

К а п и л л я р и з а ц и я м ы ш е ч н о й т к а н и . Различия в двигательной активности оказывали влияние на характер организации капиллярной сети в мышечной ткани рыб. Капилляры белых мышц пелагических рыб были на 224-333 мкм короче ($p < 0,001$) и имели меньший диаметр (табл. 1). Общая плотность капиллярной сети (N_{ct}) на поперечном срезе мышц составляла 91-95 на 1 мм², что на 30-40 % ($p < 0,001$) выше, чем у донных рыб. Максимальная плотность отмечена у высокоподвижной ставриды – $95,1 \pm 1,6$, а минимальная – $67,4 \pm 1,1$ на 1 мм² у донной скорпены. В условиях аквариумного содержания число функционирующих капиллярных единиц в ткани активных рыб (N_c) равнялось 51,4-57,3 на 1 мм². У донных видов оно было заметно ниже (39,7-42,3 на 1 мм²). В тоже время, величина капиллярного резерва была близка у обеих экологических групп рыб и составляла 37-46 % от общего числа капилляров. Для белых мышц пелагических видов была характерна также высокая эффективность капилляризации ткани. Индекс N_c/N_f имел более высокие значения (0,80-0,86 – пелагические виды; 0,49-0,53 – донные виды), то есть на одно мышечное волокно приходилось большее число капиллярных единиц.

Таблица 1 – Плотность и морфометрические характеристики капиллярной сети и мышечных волокон у пелагических и донных видов морских рыб

Виды рыб	n	N_{ct} , кол-во мм ⁻²	d , мкм	l , мкм	N_f , кол-во мм ⁻²	R_f , мкм
Сингиль	14	$90,9 \pm 1,7$	$3,83 \pm 0,02$	876 ± 9	$114,2 \pm 2,0$	$52,8 \pm 0,5$
Ставрида	12	$95,1 \pm 1,6$	$3,82 \pm 0,01$	855 ± 7	$110,7 \pm 3,4$	$53,7 \pm 0,8$
Мартовик	12	$69,3 \pm 1,3$	$3,91 \pm 0,03$	1100 ± 19	$142,0 \pm 5,3$	$47,5 \pm 0,8$
Скорпена	15	$67,4 \pm 1,1$	$3,92 \pm 0,02$	1188 ± 21	$126,7 \pm 4,5$	$50,4 \pm 0,9$

Примечание: n – число особей; N_{ct} – общая плотность капиллярной сети; d – диаметр капилляра; l – длина капилляра; N_f – число мышечных волокон; R_f – радиус мышечных волокон

Следует отметить, что белая мышечная ткань пелагических рыб в сравнении с донными видами имела ряд морфологических особенностей. Волокна ее были на 5-13 мкм ($p < 0,05$) толще (R_f), а плотность их на поперечном сечении (N_f) на 11-28 % ниже ($p < 0,05$).

Д и ф ф у з и о н н ы е х а р а к т е р и с т и к и . Диффузионная способность гемато-паренхиматозного барьера зависит от следующих характеристик:

- толщины диффузионного слоя;
- площади диффузионной поверхности капиллярной сети;
- диффузионных свойств самой ткани.

Различия в организации капиллярной сети мышц, отмеченные выше, определили несовпадение этих характеристик у рыб различной естественной подвижности (см. табл. 2). Так, площадь диффузионной

поверхности капилляров, рассчитанная на 1 мм^3 ткани (S) и поверхностный показатель (III) у пелагических рыб имели более высокие значения, чем у донных. Для видов, кардинально отличающихся по уровню естественной подвижности (ставрида и скорпена) в состоянии относительного покоя разница достигала 37-47 % ($p < 0,001$).

Таблица 2 – Диффузионные характеристики скелетных мышц пелагических и донных видов морских рыб

Виды рыб	n	$S, \text{ мм}^2 \text{ мм}^{-3}$	$III, \%$	$R_k, \text{ мкм}$	$V, \text{ мм}^3 (10^{-3})$
Сингиль	14	$2,18 \pm 0,04$	$5,79 \pm 0,08$	$59,3 \pm 0,5$	$9,70 \pm 0,24$
Ставрида	12	$2,28 \pm 0,03$	$6,15 \pm 0,05$	$57,9 \pm 0,5$	$9,02 \pm 0,18$
Мартовик	12	$1,70 \pm 0,03$	$4,04 \pm 0,07$	$67,9 \pm 0,7$	$16,0 \pm 0,5$
Скорпена	11	$1,66 \pm 0,03$	$4,19 \pm 0,06$	$68,8 \pm 0,6$	$17,7 \pm 0,4$

Примечание: n – число особей; S – площадь диффузионной поверхности; III – поверхностный показатель; R_k – радиус Круга; V – объем тканевого цилиндра

Толщина диффузионного слоя в мышечной ткани активных рыб, напротив, была меньше. Об этом свидетельствовали более низкие значения радиуса Круга (R_k) и объема тканевого цилиндра (V).

На диффузионную способность газов в тканевых структурах оказывают существенное влияние содержание липидов и воды. Проведенный химический анализ показал наличие существенных различий в содержании данных соединений в мышечной ткани рыб, отличающихся уровнем естественной подвижности. Уровень липидов в мышцах пелагических видов был заметно выше. Максимальное содержание отмечали у высокоподвижной ставриды: $2,68 \pm 0,14 \text{ мг г}^{-1}$, а минимальное у донной скорпены: $1,87 \pm 0,18 \text{ мг г}^{-1}$. Зависимость содержания воды в мышечной ткани от активности рыб носила обратный характер. У пелагических рыб оно было на 5-7 % ниже ($p < 0,05$) и составляло 75-78 %.

Как уже отмечалось, диффузия кислорода в ткани зависит от толщины диффузионного слоя, площади диффузионной поверхности и диффузионных свойств самой ткани. Первые два фактора фактически определяются числом функционирующих капиллярных единиц, последний – химическим составом мышечной ткани.

Липиды облегчают диффузию, вода, напротив, замедляет. Это связано с тем, что коэффициент растворимости кислорода в липидном слое в несколько раз выше, чем в воде [14]. Известно, что при увеличении окислительной активности мышц содержание липидов в ткани с течением времени повышается [15]. Надо полагать, что ограничение двигательной активности и снижение кислородного запроса мышц должно оказывать противоположное действие. Имеющаяся информация подтверждает данное положение. Содержание липидов в скелетных мышцах у донных рыб в сравнении с пелагическими видами снижено [16-18], а жирно-кислотный состав триацилглицеридов и фосфолипидов отличается более высокой степенью насыщенности [16, 17]. Эти качества должны осложнять диффузию кислорода в мышечной ткани малоподвижных рыб.

Таким образом, плотность капиллярной сети в белых скелетных мышцах подвижных рыб (сингиль, ставрида) была на 30-40 % выше, чем у донных видов (мартовик, скорпена). Сосуды были короче и мельче. Это обеспечивало сокращение диффузионных расстояний (R_k и V) и увеличивало площадь диффузионной поверхности (S и III). Мышечная ткань активных видов отличалась также повышенным содержанием липидов, при сравнительно невысоком уровне воды. Все выше перечисленное позволяет предположить то, что диффузия кислорода в скелетных мышцах пелагических рыб в сравнении с донными видами должна носить облегченный характер.

Список литературы / References:

1. Shulman G.E., Love R.M. The Biochemical Ecology and Marine Fishes. *Adv. Mar. Biol.*, 1999, vol. 36, p. 347.
2. Кляшторин Л.Б. *Водное дыхание и кислородные потребности рыб*. М.: Легкая и пищ. пром-сть, 1982, 168 с. [Klyashtorin L.B. *Water breathing and oxygen needs of fish*. Moscow: Lyogkaya i pischevaya promishlennost, 1982, 168 p. (In Russ.)]
3. Soldatov A.A. Peculiarities of organization and functioning of the fish red blood system (review). *J. Evolutionary Biochem. Physiol.* (Springer), 2005, vol. 41, no. 3, pp. 272-281.
4. Soldatov A.A. Oxygen-Dissociation Properties of Blood and Intraerythrocytic Medium Composition in Sea Fish with Different Motor Activity. *J. Evolutionary Biochem. Physiol.* (Springer), 1997, vol. 33, no. 6, pp. 534-539.
5. Савина М.В. *Механизмы адаптации тканевого дыхания в эволюции позвоночных*. С.-Пб.: Наука, 1992, 200 с. [Savina M.V. *Adaptation mechanisms of tissue respiration in the evolution of vertebrates*. St.-Petersburg: Nauka, 1992, 200 p. (In Russ.)]
6. Soldatov A.A. Cytochrome System and Oxygen Tension in Muscle Tissue of Salt-Water Fish with Different Natural Activity. *J. Evolutionary Biochem. Physiol.* (Springer), 1996, vol. 32, no. 2, pp. 112-115.
7. Шошенко К.А., Баранов В.И., Брод В.И., Вязовой В.В., Голубь А.С., Иванова С.Ф., Нешумова Т.В. Органное кровоснабжение и особенности кислородного транспорта в мышцах. *Исследование энергетики движения рыб*, 1984, с. 78-115. [Shoshenko K.A., Baranov V.I., Brod V.I., Vyazovoi V.V., Golub A.S., Ivanova S.F.,

Neshumova T.V. Organ blood flow and characteristics of oxygen transport in muscles. *The study of the energy of the movement of the fish*, 1984, pp. 78-115. (In Russ.)]

8. Soldatov A.A. Organ blood flow and vessels of microcirculatory bed in fish (review). *J. Evolutionary Biochem. Physiol.* (Springer), 2006, vol. 42, no. 3, pp. 243-252.

9. Soldatov A.A. Physiological Aspects of Effects of Urethane Anesthesia on the Organism of Marine Fishes. *Hydrobiol. J.* (Begell House), 2005, vol. 41, no. 1, pp. 113-126.

10. Киселева А.Ф., Житников А.Я., Кейсевич Л.В. [и др.] *Морфофункциональные методы исследования в норме и при патологии*. Киев: Здоров'я, 1983, 168 с. [Kiseleva A.F., Zhitnikov A.Ya., Keisevich L.V., *Morphological and functional methods of research in norm and at a pathology*. Kiev: Zdorov'ye, 1983, 168 p. (In Russ.)]

11. Houston A.H. Blood and circulation. *Methods for fish biology*, 1990, pp. 273-334.

12. Кучеренко Н.Е., Васильев А.Н. *Липиды*. Киев: Вища школа, 1985, 247 с. [Kucherenko N.E., Vasiliev A.N. *Lipids*. Kiev: Vishcha shkola, 1985, 247 p. (In Russ.)]

13. Соколова Г.П. Определение содержания и удельной радиоактивности общих липидов в тканях. *Методы биохимических исследований (липидный и энергетический обмен)*, 1982, с. 55-58. [Sokolova G.P. Determination of content and specific radioactivity of total lipids in the tissues. *Methods of biochemical studies (lipid and energy metabolism)*, 1982, pp. 55-58. (In Russ.)]

14. Londraville R.L., Sidell B.D. Ultrastructure of aerobic muscle in antarctic fishes may contribute to maintenance of diffusive fluxes. *J. Exp. Biol.*, 1990, vol. 150, pp. 205-220.

15. Driedzic W.R., Phleger C.F., Fields J.H.A., French C. Alterations in energy metabolism associated with the transition from water to air breathing in fish. *Can. J. Zool.* 1978, vol. 56, no. 4(2), pp. 730-735.

16. Шульман Г.Е., Щепкин В.Я., Яковлева К.К., Хоткевич Т.В. Липиды и их использование при плавании рыб. *Элементы физиол. и биох. общего и активного обмена у рыб*, 1978, с. 100-121. [Shulman G.E., Shchepkin V.Ya., Yakovleva K.K., Khotkevich T.V. Lipids and their use in swimming fish. *Elements of physiology and biochemistry total and active metabolism in fish*, 1978, pp. 100-121. (In Russ.)]

17. Юнева Т.В. Сезонная динамика жирно-кислотного состава липидов черноморских рыб – хамсы и шпрота. *Биоэнергетика гидробионтов*, 1990, с. 196-207. [Yuneva T.V. Seasonal dynamics of fatty acid composition of lipids of sea fish – the anchovy and sprat. *Bioenergetics of aquatic animals*, 1990, pp. 196-207. (In Russ.)]

18. Love R.M. *The chemical biology of fish*. Vol. 2. London: Academic Press, 1980, 943 p.

ДЕЙСТВИЕ СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ КРОВИ У КРЫС В ОПЫТАХ *IN VITRO* И *IN VIVO*

Новиков В.В., Яблокова Е.В., Фесенко Е.Е.

ФГБУН Институт биофизики клетки РАН

ул. Институтская, 3, г. Пущино, Московская обл., 142290, РФ

e-mail: docmag@mail.ru

Аннотация. Показано, что воздействие комбинированными постоянным (42 мТл) и коллинеарным ему очень слабым переменным низкочастотным (1 Гц, 600 нТл; 4,4 Гц, 100 нТл; 16,5 Гц, 160 нТл) магнитными полями на гепаринизированную и разбавленную фосфатным буфером венозную кровь крыс при физиологических температурах вызывает резкое усиление ее хемилюминесценции после добавки люминола. В опытах *in vivo* при воздействии магнитными полями на весь организм так же, как и в опытах *in vitro* отмечаются значительные изменения интенсивности хемилюминесценции крови. В этом случае отмечены и изменения в кинетике процесса люминол-зависимой хемилюминесценции. Появляется дополнительный отсроченный пологий максимум (приблизительно 500 секунд после введения люминола), который отсутствует в опытах *in vitro* и у контрольных животных.

Ключевые слова: магнитное поле, кровь, активные формы кислорода, хемилюминесценция

EFFECTS OF WEAK MAGNETIC FIELDS ON BLOOD CHEMILUMINESCENCE IN EXPERIMENTS ON RATS *IN VITRO* AND *IN VIVO*

Novikov V.V., Yablokova E.V., Fesenko E.E.

Institute of Cell Biophysics, Russian Academy of Sciences,

Institutskaya St., 3, Pushchino, 142290, Russia

e-mail: docmag@mail.ru

Abstract. It is shown that the combined effect of a static magnetic field (42 mT) and low-frequency collinear very weak alternating magnetic field with low frequency (1 Hz, 600 nT; 4.4 Hz, 100 nT; 16.5 Hz, 160 nT) on heparinized and diluted with phosphate buffer venous blood of rats at physiological temperatures causing a sharp increase in its chemiluminescence after addition of luminol. In experiments *in vivo* when exposed to magnetic fields of the entire organism as well as in *in vitro* experiments show significant changes in blood chemiluminescence intensity. In this case was detected changes in the kinetics of luminol-dependent chemiluminescence. In this case the additional deferred flat maximum was observed (approximately 500 seconds after the injection of luminol), which is absent in experiments *in vitro* and in control animals.