

## МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ

УДК [577.352:612.111]:796.071.2-056.22

**А.Ф. МАРЦИНКЕВИЧ**, канд. биол. наук  
доцент кафедры общей и клинической биохимии  
Витебский государственный медицинский университет,  
Республика Беларусь  
E-mail: [biochemistry\\_vsmu@mail.ru](mailto:biochemistry_vsmu@mail.ru)



Статья поступила 18 марта 2022 г.

### ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МЕМБРАН ЭРИТРОЦИТОВ У СПОРТСМЕНОВ ЦИКЛИЧЕСКИХ ВИДОВ СПОРТА

*В статье рассматриваются особенности функционального состояния мембран эритроцитов у спортсменов, занимающихся циклическими видами спорта. Исследование проведено с помощью биохимических и статистических методов.*

**Цель работы:** *определить состав, физико-химические свойства мембран эритроцитов и липопротеиновых комплексов крови спортсменов циклических видов спорта во взаимосвязи с функциональной активностью эритроцитов.*

*Проведенные исследования показывают, что микровязкость аннулярного и общего липидного фондов мембран эритроцитов спортсменов ниже, чем у лиц, не занимающихся спортом. Вместе с тем, мембраны эритроцитов спортсменов обладают в сравнении с лицами, не занимающимися спортом, повышенной микрополярностью в зоне аннулярного и общего липидного фондов мембраны эритроцитов. Также установлено статистически значимое повышение окислительной модификации белков мембран эритроцитов спортсменов, сопряженное, вероятно, с интенсивным транспортом кислорода, что подтверждается согласованным ростом выявленных отличий с уровнем спортивного мастерства. Получены сведения о жирнокислотном профиле основных фосфолипидов мембран эритроцитов, демонстрирующие увеличение количества ПНЖК. Определено влияние физико-химических свойств мембран клеток капиллярной крови на интенсивность отдачи кислорода эритроцитами венозной крови. Установлена взаимосвязь физико-химических свойств мембран эритроцитов и ЛПК, что позволяет в дальнейшем использовать эту взаимосвязь для оценки эффективности фармакологической и диетологической коррекции липидного и жирнокислотного состава мембран эритроцитов. Показана взаимосвязь микрополярности аннулярного слоя мембран эритроцитов и интенсивности отдачи кислорода.*

**Ключевые слова:** *мембрана эритроцита, спорт, липиды, ПОЛ.*

**MARTSINKEVICH A.F.**, PhD in Biol. Sc.  
Associate Professor Department of General and Clinical Biochemistry  
Vitebsk State Medical University, Republic of Belarus  
E-mail: [biochemistry\\_vsmu@mail.ru](mailto:biochemistry_vsmu@mail.ru)

### FUNCTIONAL FEATURES OF ERYTHROCYTE MEMBRANES IN CYCLICAL ATHLETES

**The objective of work:** *to determine the composition, physicochemical properties of erythrocyte membranes and lipoprotein blood complexes of cyclic sports athletes in conjunction with the functional activity of erythrocytes, as well as the effect on these indicators of the dietary regime.*

**The obtained results and their scientific novelty:** *The research show that the microviscosity of annular and total lipid pools erythrocyte membranes athletes is lower than that of persons not involved in sports. However, the erythrocyte membrane athletes have in comparison with persons who are not involved in sports, increased micropolar zone of annular and total lipid pools erythrocyte membrane. Also, found a statistically significant increase in the oxidative modification of proteins of erythrocyte membranes athletes conjugate, probably with heavy transport oxygen, as evidenced by a consistent increase in the level of the identified differences sportsmanship. Obtained information on the fatty acid profile of the major phospholipids of erythrocyte membranes, showing an increase in the amount of PUFA. The influence of the physicochemical properties of the cell membranes of capillary blood on oxygen release rate of venous blood erythrocytes. The interrelation of physicochemical properties of the membranes of red blood cells and LPC, which allows for pharmacological and nutritional correction of lipid and fatty acid composition of erythrocyte membranes. The interrelation micropolarity of annular layer of erythrocyte membranes and the intensity of the oxygen release. Based on simulated data expected negative effect on the intensity of reception of antioxidants oxygen release erythrocytes venous blood. It is shown that the intake of flaxseed oil leads to a decrease in microviscosity and micropolarity of erythrocyte membranes, which in athletes is accompanied by an increase in working capacity.*

**Practical use of results:** *in sports medicine for the correction of the lipid composition of erythrocyte membranes athletes to optimize blood oxygen and efficiency.*

**The field of use:** *training courses in biochemistry, normal and pathological physiology, sports medicine.*

**Keywords:** *erythrocyte membranes, sports, lipids, LPO.*

**Введение.** Активность доставки кислорода эритроцитами в ткани человека во многом определяет функционирование энергетических систем организма. Мембрана эритроцита является одним из ключевых участников массопереноса кислорода в ткани [1, 4, 21] за счет высокой динамичности изменения ее состава и оказываемого влияния на деформируемость эритроцита [3, 10] как основного фактора его проникновения в микроциркуляторное русло [6, 7]. При высоких нагрузках, характерных для спорта, изменяются константные показатели внутренней среды организма, в частности, активная физическая деятельность приводит к значительному увеличению температуры тела [1] и снижению рН крови за счет накопления молочной кислоты, а также к росту активности свободно-радикального окисления [6, 8, 9, 12, 14, 19, 21, 23]. Такие изменения предъявляют повышенные требования к составу и физико-химическим свойствам мембран эритроцитов (МЭ), как факторам, определяющим интенсивность трансмембранного переноса кислорода и, в конечном счете, работоспособность спортсмена. Согласно последним исследованиям, транспорт кислорода через мембрану эритроцита является активным процессом, который осуществляется при помощи аквапоринов. Известно, что активность трансмембранных белков определяется их липидным микроокружением. В свою очередь, липидный состав влияет на физико-химические

свойства МЭ, определяющих скорость латеральной диффузии белков и активность реакции мембран на внешние воздействия. Необходимо также отметить сопряженность аннулярного липидного слоя (прибелковых липидов), влияющего на конформацию трансмембранных белков и, как следствие, на процесс переноса кислорода и общего липидного фонда, обновляющегося за счет обмена с ЛПК [2, 5, 9, 12, 15, 21].

Таким образом, с высокой степенью уверенности можно утверждать, что существует прямая связь между эффективностью доставки кислорода к рабочим органам, составом и физико-химическими свойствами МЭ. Однако до настоящего времени в научных исследованиях молекулярных основ спортивной деятельности не уделялось должного внимания этой проблеме.

Используемые сокращения: ЛПК – липопротеиновые комплексы, ЛПВП – липопротеины высокой плотности, ЛПНП – липопротеины низкой плотности, ЛПОНП – липопротеины очень низкой плотности, МВА, МВО – вязкость аннулярного и общего липидного фонда, МПА и МПО – микрополярность аннулярного и общего липидного фонда, МЭ – мембрана эритроцита, ПНЖК – полиненасыщенные жирные кислоты, ПОЛ – перекисное окисление липидов, СФМ – сфингомиелины, ФХ – фосфатидилхолины, ФЭА – фосфатидилэтаноламины, ПГФ – полиглицерофосфатиды, ХС – холестерол, ТГ – триацилглицеролы

*Целью* исследования является определение состава, физико-химических свойств мембран эритроцитов и липопротеиновых комплексов крови спортсменов циклических видов спорта во взаимосвязи с функциональной активностью эритроцитов, а также влияния на указанные показатели пищевого режима.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Исследовать состав мембран эритроцитов (содержание белка, холестерина, общих фосфолипидов и их индивидуальных классов, спектр жирных кислот фосфатидилхолинов и сфингомиелинов) у спортсменов циклических видов спорта и лиц, не занимающихся спортом.

2. Исследовать физико-химические свойства мембран эритроцитов (микровязкость и микрополярность, количество триптофанов и битирозинов, конъюгатов лизина с продуктами ПОЛ) у спортсменов циклических видов спорта и лиц, не занимающихся спортом.

3. Исследовать активность отдачи кислорода эритроцитами венозной крови спортсменов циклических видов спорта и лиц, не занимающихся спортом.

4. Исследовать особенности липидтранспортной системы (содержание триацилглицеролов и холестерина, жирных кислот фосфатидилхолинов и сфингомиелинов, физико-химические свойства нативных липопротеиновых комплексов крови) у спортсменов циклических видов спорта и лиц, не занимающихся спортом.

*Объектом* исследования являются спортсмены циклических видов спорта разного уровня квалификации (I-й взрослый разряд, кандидаты в мастера спорта и мастера спорта), а также лица, не занимающиеся регулярными физическими нагрузками.

*Предметом* исследования является интенсивность отдачи кислорода эритроцитами, состав и физико-химические свойства мембран эритроцитов и липопротеиновых комплексов крови.

Проведенные исследования показывают, что микровязкость аннулярного и общего липидного фондов МЭ спортсменов ниже, чем у лиц, не занимающихся спортом. Вместе с тем, МЭ спортсменов обладают в сравнении с лицами, не занимающимися спортом, повышенной микрополярностью в зоне аннулярного и общего липидного фондов МЭ. Также установлено статистически значимое

повышение окислительной модификации белков МЭ спортсменов, сопряженное с повышением транспорта кислорода, что подтверждается согласованным ростом выявленных отличий с уровнем спортивного мастерства. В жирнокислотном профиле основных фосфолипидных классов МЭ у спортсменов показано увеличение количества ПНЖК. Показано влияние микровязкости и микрополярности мембран клеток капиллярной крови на интенсивность отдачи кислорода эритроцитами венозной крови. Выявлена взаимосвязь физико-химических свойств МЭ и ЛПК. Установлена взаимосвязь микрополярности аннулярного слоя МЭ и интенсивности отдачи ими кислорода. На основании полученных результатов сформулировано предположение о возможном негативном влиянии приема антиоксидантов на интенсивность отдачи кислорода эритроцитами венозной крови. Показано, что прием льняного масла приводит к понижению микровязкости и микрополярности МЭ, сопровождающегося у спортсменов увеличением работоспособности.

#### **Материалы и методы исследования.**

Для исследования состава и физико-химических свойств МЭ спортсменов были сформированы группы наблюдения из спортсменов циклических видов спорта и лиц, не занимающихся регулярными тренировочными нагрузками.

Группа спортсменов (основная группа наблюдения) включала в себя спортсменов циклических видов спорта с уровнем спортивной квалификации от I-го взрослого разряда до мастера спорта. Группа лиц, не занимающихся спортом (контрольная группа), была сформирована из практически здоровых юношей и девушек в равном соотношении. Группы не отличались по возрасту и соотношению полов.

В исследовании активности переноса кислорода, состава и физико-химических свойств МЭ, а также липопротеиновых комплексов крови участвовало 42 спортсмена и 38 человек контрольной группы. Исследование показателей активности отдачи кислорода, перекисного окисления липидов МЭ и окислительной модификации белков МЭ выполнено с участием 36 спортсменов и 15 человек контрольной группы. Исследование влияния питания, обогащенного нутриентами, проведено с участием 31 спортсмена, распределенного в опытную (26 человек), и 5 человек контрольной группы.

Забор крови проводили из пальца (капиллярная кровь) и из вены натощак. Венозная кровь отбиралась в вакутайнеры с цитратом натрия и центрифугировалась при 1000 об/мин для выделения плазмы. Мембраны эритроцитов выделяли по методу Доджа [17] и стандартизовали по белку до концентрации 100 мкг/мл. Стандартизованные МЭ объемом 2 мл титровали пиреном в концентрации 1, 2, 4, 6, 8 и 10 мкмоль/л со снятием спектра флуоресценции на спектрофлуориметре SOLAR CM2203 (Республика Беларусь) при 286 и 337 нм. Интенсивность испускания мономеров и эксимеров пирена определяли в максимумах при 374, 394 и 470 нм [4, 7, 11, 20].

Количество белка в мембранах эритроцитов определяли по методу Лоури, определение фосфолипидного профиля МЭ проводили двумерной тонкослойной хроматографией хлороформных экстрактов МЭ после их идентификации по  $R_f$ , минерализации и окрашивания реактивом Васьковского [3, 7, 20]. Определение содержания общих фосфолипидов проводили после их минерализации по оптической плотности стандарта при длине волны 615 нм. Спектр жирных кислот основных фосфолипидных классов, выделенных в ходе тонкослойной хроматографии, определяли на газовом хроматографе Focus GC (США) с пламенно-ионизационным детектором и капиллярной колонкой ВРХ70, 60 м × 0,25 мм, по времени удержания их стандартов (Sigma Aldrich). ХС экстрагировали из МЭ изопропиловым спиртом. Перешедший в экстракт общий холестерол определяли в реакции Златкиса-Зака [16, 19, 23].

Липопротеиновые комплексы крови выделяли методом последовательного ультрацентрифугирования в растворе бромида натрия на ультрацентрифуге Beckman Optima LE80K с использованием ротора 50.4Ti. Физико-химические свойства ЛПК определяли аналогично мембранам эритроцитов [5, 13, 15-19].

Активность отдачи кислорода эритроцитами венозной крови определяли при помощи электрода Кларка на аппаратном комплексе Record4 (Россия) [7, 8, 10, 19].

Количество ХС и ТГ в ЛПК определяли ферментативными наборами фирмы Sorma-Diana (Республика Беларусь) с использованием полуавтоматического биохимического анализатора Screenmaster (Финляндия) [13, 16].

Для определения работоспособности использовали аппаратно-программный ком-

плекс «Интеркард-4» с последующим расчетом показателя PWC-170.

Статистическую обработку данных проводили при помощи языка программирования R. Проверка на нормальность распределения выполнялась при помощи критерия Шапиро-Уилка [22]. Парное сравнение исследуемых признаков производили при помощи t-критерия Стьюдента (при нормальном распределении) или при помощи W-критерия Вилкоксона. Множественное сравнение осуществляли с использованием H-критерия Краскела-Уоллиса.

Отличия считали статистически значимыми при  $p < 0,05$ .

#### **Результаты исследований.**

*Исследование состава МЭ спортсменов и лиц, не занимающихся спортом.*

В ходе изучения состава МЭ было установлено статистически значимое ( $p < 0,01$ ) повышение уровня ОФЛ у спортсменов.

У спортсменов содержание ФХ было достоверно выше, а фосфатидилэтаноламинов ниже ( $p < 0,05$ ), чем у лиц, не занимающихся спортом. Оценка отношения количества СФМ к количеству ФХ, отражающего текучесть наружного слоя мембраны эритроцита, показала его снижение у спортсменов на 52,29 % ( $p < 0,01$ ), что свидетельствует о более высокой текучести МЭ у спортсменов. Отношение (СФМ+ФХ)/ФЭА может служить для оценки асимметричности бислоя липидов, т.к. производные СФМ и ФХ преимущественно локализованы на наружной стороне мембраны, в то время как ФЭА – на внутренней. У спортсменов отношение (СФМ+ФХ)/ФЭА было статистически значимо выше ( $p < 0,05$ ), что можно расценить как снижение асимметрии мембраны и ее переход в метастабильное состояние, свидетельствующее о напряжении систем адаптации. Сравнение процентного отношения фосфолипидных классов продемонстрировало, что у спортсменов доля ФХ, как и в предыдущем случае, была достоверно выше ( $p < 0,05$ ), а СФМ ниже ( $p < 0,01$ ), чем у лиц, не занимающихся спортом.

Количество ХС в мембранах эритроцитов у спортсменов и контрольной группы значимых отличий не имело ( $p=0,8$ ), однако количество ОФЛ было достоверно выше в группе спортсменов ( $p < 0,05$ ), в то время как показатель ХС/ОФЛ снижался ( $p < 0,01$ ).

В спектре жирных кислот СФМ и ФХ обнаружено снижение процентного содержания С14:0 и С16:0 в обоих фосфолипидных клас-

сах и С16:1 в ФХ спортсменов, а также рост С18:3 в СФМ у спортсменов ( $p < 0,05$ ). Отношение суммы насыщенных жирных кислот к сумме полиненасыщенных (в ФХ) у спортсменов было статистически значимо ниже ( $p < 0,05$ ).

Указанные данные также свидетельствуют о более высокой текучести МЭ у спортсменов.

*Исследование физико-химических свойств МЭ у спортсменов циклических видов спорта и лиц, не занимающихся спортом.*

В ходе исследования было установлено, что микровязкость при белковом липидного окружения была статистически значимо меньше у спортсменов, причем данная закономерность сохранялась при всех концентрациях пирена. Микровязкость общего липидного фонда у спортсменов также была снижена по сравнению с контрольной группой. При исследовании отношения МВА к МВО найдено, что данный показатель не имел статистически значимых различий у спортсменов и лиц, не занимающихся спортом.

Сравнение микрополярности аннулярного и общего липидных фондов спортсменов и лиц, не занимающихся спортом, может указывать на более высокую активность перекисной модификации МЭ у спортсменов. Было выявлено, что при всех концентрациях пирена микрополярность аннулярного липидного слоя у спортсменов выше, чем у лиц, не занимающихся спортом.

Исследование интенсивности испускания триптофанилов показало, что у спортсменов этот показатель статистически значимо ниже, чем у лиц контрольной группы, что говорит о более высокой активности окислительной модификации белков МЭ спортсменов [14].

Анализируя графическое представление уравнения Штерна-Фольмера, можно получить сведения о количестве доноров энергии, доступных для тушения, и о среднем расстоянии между донором и акцептором [6]. Исследование доступности триптофанилов тушению, отражающее конформационные изменения белков, показало, что у спортсменов этот показатель был ниже, чем у лиц, не занимающихся спортом, что указывает на конформационные изменения белковой молекулы, препятствующие свободному переносу энергии с ароматического кольца триптофанилов на пирен.

Расстояние  $\theta$  между поверхностью бислоя и донорами первого рода было достоверно выше в контрольной группе ( $p < 0,05$ ), что

говорит о погружении белковой молекулы в толщу мембраны у спортсменов. Учитывая снижение доступности тушения доноров первого рода и их неизменное количество, а также отличия  $\theta$ , существует вероятность, что в мембранах эритроцитов спортсменов белок претерпевает внутримолекулярные, не затрагивающие внешние слои, конформационные перестройки.

Группы спортсменов были гетерогенны по уровню перекисной модификации белков МЭ в зависимости от их квалификации. По всем перечисленным показателям интенсивность перекисного окисления возрастала по мере увеличения спортивной квалификации. Окислительная модификация белковых молекул подтверждается достоверно ( $p < 0,01$ ) более высокой флуоресценцией битирозинов и конъюгатов лизина с продуктами ПОЛ (Лиз-ПОЛ) ( $p < 0,01$ ) в группе спортсменов.

Анализ главных компонент на основании показателей окислительной модификации белков продемонстрировал разделение всей совокупности обследованных лиц на 4 достаточно четко очерченных кластера (рисунок 1).

Пересечение некоторых кластеров может быть объяснено различной физической подготовкой спортсменов в момент обследования. Вместе с тем, можно отметить однозначное разделение группы лиц, не занимающихся спортом, кандидатов в мастера, а также мастеров спорта.

Таким образом, исследование физико-химических свойств МЭ согласуются с представленными в предыдущем разделе данными о более высокой текучести МЭ спортсменов, а также указывают на неоднородность группы спортсменов в зависимости от уровня спортивного мастерства

*Активность отдачи кислорода эритроцитами венозной крови спортсменов и лиц, не занимающихся спортом*

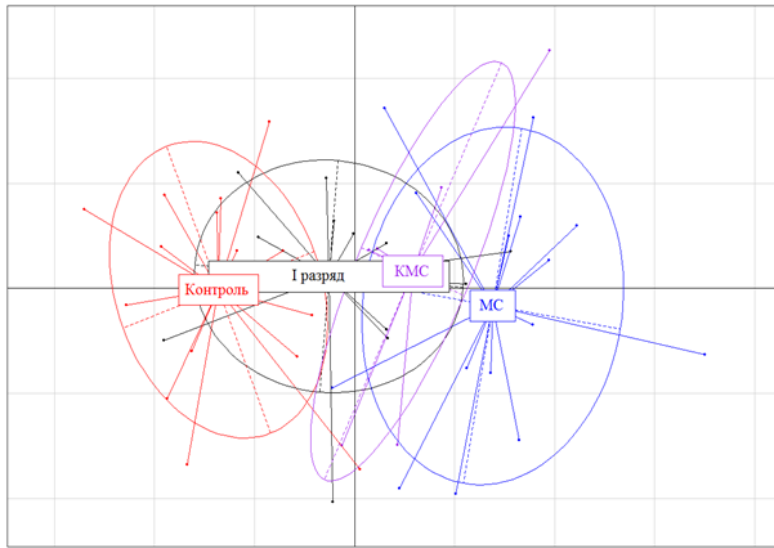
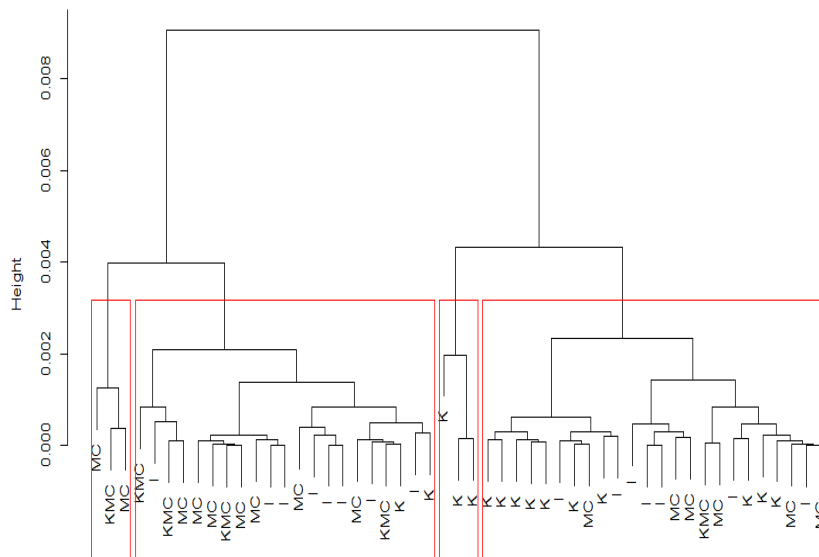


Рисунок 1. – Анализ главных компонент

В результате исследования выявлено, что в группе спортсменов тангенс угла наклона кривой насыщения кислородом яички был достоверно больше ( $p < 0,01$ ), чем в группе лиц, не занимающихся спортом, что свидетельствует о более высокой активности трансмембранного переноса кислорода у спортсменов. Несмотря на то, что спортсмены были гомогенны по уровню спортивного

мастерства ( $p = 0,45$ ), иерархическая кластеризация позволяет выделить четыре кластера, один из которых полностью сформирован спортсменами с квалификацией кандидат в мастера и мастер спорта, второй состоит из лиц контрольной группы, а оставшиеся два имеют практически равномерное распределение как спортсменов, так и лиц контрольной группы (рисунок 2).



Примечание – К – контрольная группа, I – спортсмены 1-го разряда, КМС – кандидаты в мастера спорта, МС – мастера спорта

Рисунок 2. – Иерархическая кластеризация спортсменов разного уровня квалификации и лиц контрольной группы по интенсивности отдачи кислорода эритроцитами венозной крови

Проведение регрессионного анализа позволило получить математическую модель для прогноза интенсивности отдачи кислорода эритроцитами венозной крови исходя из показателей физико-химических свойств клеток капиллярной крови. Анализ интенсивности отдачи кислорода при помощи кластерного анализа позволил выявить 3 основных кластера активности переноса кислорода от эритроцитов [12, 14]. Для первого кластера (низкая активность переноса кислорода) диапазон значений интенсивности отдачи кислорода составил 0,001–0,009. Для второго кластера (умеренная активность переноса кислорода) диапазон значений составил 0,009–0,013. Для третьего кластера (высокая активность переноса кислорода) диапазон значений составил 0,013–0,017.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о более высокой активности переноса кислорода у спортсменов, а разработанная модель может позволить дозировать физическую нагрузку в зависимости от степени активности отдачи кислорода эритроцитами венозной крови.

#### **Особенности липидтранспортной системы у спортсменов и лиц, не занимающихся спортом**

В ходе изучения состава ЛПК установлено, что статистически значимые различия присутствуют в содержании ТГ ЛПВП, количество которых было ниже ( $p < 0,01$ ) у спортсменов и составляло  $0,014 \pm 0,030$  и

$0,037 \pm 0,045$  ммоль/л в группах спортсменов и контроля соответственно.

Установлено, что у спортсменов микровязкость аннулярного и общего липидного фондов всех ЛПК была достоверно выше (таблица 1), чем у лиц, не занимающихся спортом.

Исследование микрополярности аннулярного и общего липидного фондов ЛПК показало его более высокие значения у спортсменов (таблица 2), что свидетельствует о введении в их состав гидрофильных радикалов (гидрокси- и оксогруппы), образующихся при активации ПОЛ [16, 19, 20, 23].

Исследование корреляционных зависимостей между микровязкостью аннулярного и общего липидного фондов ЛПК и МЭ спортсменов и лиц контрольной группы показало наличие статистически значимой обратной связи между физико-химическими свойствами МЭ и ЛПВП (таблица 3), что указывает на возможность обновления мембранных липидов эритроцитов через обмен с ЛПВП [7, 21].

У спортсменов микровязкость аннулярного и общего липидного фондов ЛПВП коррелировала с содержанием ХС ( $r = 0,37-0,56$ ). Вероятно, отличия физико-химических свойств ЛПВП и их связь с ХС адаптационно обусловлены более высокой скоростью его обмена у спортсменов. Микровязкость обоих фондов ЛПНП и ЛПОНП достоверно коррелирует с содержанием ХС у спортсменов и у лиц, не занимающихся спортом.

Таблица 1. – Микровязкость аннулярного и общего липидного фондов липопротеинов различной плотности у спортсменов и лиц контрольной группы ( $\bar{x} \pm \sigma$ )

	ЛПВП					
	МВА1	МВА2	МВА4	МВО1	МВО2	МВО4
Спортсмены	51,64±11,60	37,55±10,7	24,1±8,72	34,0±5,57	26,53±7,2	18,01±6,3
Контроль	45,23±10,6	30,52±10,8	18,55±7,64	30,05±6,16	21,63±6,99	14,14±5,5
р-значение	0,035	0,012	0,014	0,009	0,008	0,013
	ЛПНП					
	МВА1	МВА2	МВА4	МВО1	МВО2	МВО4
Спортсмены	39,38±12,71	30,82±13,7	21,61±11,7	32,59±10,1	25,38±10,7	17,37±8,9
Контроль	33,89±14,21	25,08±13,8	16,53±11,9	26,93±9,93	20,53±10,5	13,35±9,2
р-значение	0,08	0,08	0,11	0,032	0,10	0,11
	ЛПОНП					
	МВА1	МВА2	МВА4	МВО1	МВО2	МВО4
Спортсмены	20,86±8,62	12,41±6,64	6,57±3,81	13,82±5,6	8,27±3,99	4,71±2,53
Контроль	11,12±6,94	6,14±4,36	3,12±2,35	17,58±43,3	4,27±2,87	2,28±1,6
р-значение	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001

Таблица 2. – Микрополярность аннулярного и общего липидного фондов ЛПК у спортсменов и лиц контрольной группы ( $\bar{x} \pm \sigma$ )

	ЛПВП					
	МПА1	МПА2	МПА4	МПО1	МПО2	МПО4
Спортсмены	1,40±0,11	1,23±0,096	1,1±0,07	0,91±0,01	0,91±0,01	0,91±0,01
Контроль	1,32±0,12	1,16±0,09	1,06±0,06	0,91±0,01	0,91±0,01	0,9±0,0
p-значение	0,0078	0,0058	0,03	0,591	0,699	0,204
	ЛПНП					
	МПА1	МПА2	МПА4	МПО1	МПО2	МПО4
Спортсмены	1,26±0,19	1,11±0,16	1,01±0,11	0,88±0,02	0,87±0,01	0,87±0,01
Контроль	1,17±0,19	1,05±0,15	0,97±0,11	0,87±0,02	0,86±0,03	0,86±0,03
p-значение	0,060	0,113	0,036	0,006	0,52	0,45
	ЛПОНП					
	МПА1	МПА2	МПА4	МПО1	МПО2	МПО4
Спортсмены	1,21±0,14	1,07±0,13	0,98±0,09	0,87±0,04	0,86±0,04	0,85±0,05
Контроль	1,1±0,13	1,01±0,1	0,95±0,09	0,88±0,06	0,86±0,05	0,85±0,06
p-значение	0,004	0,053	0,081	0,253	0,266	0,603

Таблица 3. – Корреляционная матрица микровязкости аннулярного и общего липидного фондов ЛПК и МЭ

	ЛПВП ~ МЭ		ЛПНП ~ МЭ		ЛПОНП ~ МЭ	
	r	p	r	p	r	p
Спорт, МВА1	-0,3543	0,044	-0,1882	0,244	0,0310	0,881
Спорт, МВА2	-0,3305	0,061	-0,1355	0,403	-0,0044	0,984
Спорт, МВА4	-0,2607	0,143	-0,2238	0,165	-0,0830	0,686
Спорт, МВО1	-0,2687	0,130	-0,0478	0,769	0,0003	1,000
Спорт, МВО2	-0,2854	0,107	-0,1009	0,534	0,0051	0,981
Спорт, МВО4	-0,3533	0,044	-0,3366	0,034	-0,2581	0,202
Контроль, МВА1	-0,4926	0,011	-0,1577	0,350	0,0433	0,814
Контроль, МВА2	-0,4838	0,013	-0,1788	0,287	0,0066	0,972
Контроль, МВА4	-0,4489	0,022	-0,1761	0,296	-0,1213	0,507
Контроль, МВО1	-0,2991	0,138	-0,0948	0,575	-0,0158	0,932
Контроль, МВО2	-0,4065	0,040	-0,1155	0,495	-0,0803	0,661
Контроль, МВО4	-0,3538	0,077	-0,2224	0,185	-0,1720	0,347

Однако абсолютное значение коэффициента корреляции выше у спортсменов.

Корреляционный анализ выявил также отрицательную зависимость ( $r = -0,35 - (-0,37)$ ) между содержанием стеариновой кислоты (C18:0) в СФМ МЭ и микровязкостью аннулярного липидного слоя ЛПВП спортсменов. Учитывая более высокую микровязкость общего и аннулярного липидных фондов ЛПВП спортсменов, можно предположить, что выявленный факт является одним из возможных механизмов ограничения поступления насыщенных жирных кислот (НЖК) в аннулярный слой МЭ. Также обнаружена положительная ( $r = 0,35-0,39$ ) зависимость между содержа-

ем линоленовой кислоты (C18:3) и микровязкостью аннулярного и общего липидных фондов ЛПВП, что подтверждает предложенную выше гипотезу о механизмах поставки ПНЖК в мембраны эритроцитов и говорит о предположительно повышенной поставке ПНЖК в общий и аннулярный фонд МЭ спортсменов. У лиц, не занимающихся спортом, отмечены иные корреляционные взаимосвязи. Была выявлена положительная зависимость ( $r = 0,39$ ) между содержанием олеиновой кислоты (C18:1) в ФХ и микровязкостью аннулярного липидного слоя ЛПВП, а также между количеством пальмитолеиновой кислоты (C16:1) в ФХ ( $r = 0,40$ ) и микровязко-



стью общего липидного фонда ЛПВП. Вероятно, у лиц, не занимающихся спортом, количество МНЖК и НЖК в МЭ лимитируется более низкой, чем у спортсменов, микровязкостью липидных фондов ЛПВП.

Микровязкость общего липидного фонда ЛПНП спортсменов прямо коррелировала с содержанием линоленовой (С18:3) кислоты в ФХ. В контрольной группе обнаружены прямые взаимосвязи между содержанием пальмитолеиновой (С16:1) и линолевой (С18:2) кислот в СФМ ( $r = 0,35$  и  $0,33-0,34$ ) и микровязкостью аннулярного липидного слоя ЛПНП. Содержание эйкозопентаеновой кислоты (С20:5) в СФМ МЭ прямо коррелировало с микровязкостью аннулярных липидов ( $r = 0,40-0,42$ ) и общего липидного фонда ( $r = 0,38-0,39$ ) ЛПНП. Количество олеиновой (С18:1) кислоты в ФХ МЭ коррелировало только с микровязкостью общего липида ( $r = 0,33-0,37$ ) ЛПНП. Вероятно, обновление жирнокислотного спектра ФХ МЭ спортсменов взаимосвязано с микровязкостью ЛПВП и ЛПНП по ПНЖК, а также СФМ по НЖК. В контрольной группе обновление жирнокислотного спектра СФМ МЭ связано с микровязкостью ЛПНП через жирные кислоты вне зависимости от их насыщенности. Жирнокислотный спектр ФХ МЭ лиц, не занимающихся спортом, коррелирует с микровязкостью ЛПНП лишь по олеиновой (С18:1) кислоте.

Таким образом, выявленные отличия свидетельствуют о значительной вовлеченности ЛПК спортсменов во взаимодействие с МЭ, что может быть использовано в дальнейшем для оценки эффективности отдачи кислорода посредством изменения пищевого режима.

#### **Заключение.**

Количество общих фосфолипидов в мембранах эритроцитов спортсменов выше, чем у лиц, не занимающихся спортом (184,99 (176,43; 198,48) ммоль/л и 29,89 (25,25; 68,77) ммоль/л соответственно,  $p < 0,01$ ). Отношение ХС/ОФЛ $\times 10^5$  в мембранах эритроцитов спортсменов ниже, чем у лиц, не занимающихся спортом (7,57 (6,72; 9,46) и 39,78 (23,00; 82,11) соответственно,  $p < 0,01$ ). У спортсменов количество ФХ в мембранах эритроцитов на 85,82% выше ( $p < 0,01$ ), а количество ФЭА на 6,5% ниже ( $p < 0,05$ ), чем у лиц, не занимающихся спортом. Отношение СФМ/ФХ у спортсменов на 52,3% ниже ( $p < 0,01$ ), а отношение (СФМ+ФХ)/ФЭА на 17,6 % выше ( $p < 0,05$ ), чем у лиц, не занимающихся спортом. В спектре жирных кис-

лот СФМ и ФХ снижено процентное содержание С14:0 и С16:0 в обоих фосфолипидных классах ( $p < 0,05$ ) и С16:1 в фосфатидилхолинах спортсменов ( $p < 0,01$ ), а также увеличено содержание С18:3n3 в сфингомиелинах у спортсменов ( $p < 0,05$ ). Отношение суммы ПНЖК к сумме НЖК в ФХ у спортсменов на 71,3% выше ( $p < 0,05$ ).

У спортсменов циклических видов спорта микровязкость аннулярного и общего липидных фондов мембраны эритроцитов на 14,7 – 14,8%\* ( $p < 0,05$ ) и 13,5–17,6%\* ( $p < 0,05$ ) ниже соответственно, а микрополярность аннулярного и общего липидных фондов мембраны эритроцитов на 15,5–17,2 %\* ( $p < 0,05$ ) и 17,1–24,6%\*<sup>1</sup> ( $p < 0,05$ ) выше соответственно, чем у лиц, не занимающихся спортом [1, 2, 9–14, 17]. Количество битирозинов и конъюгатов лизина с продуктами ПОЛ в мембранах эритроцитов спортсменов на 19,2% ( $p < 0,05$ ) и 67,1% ( $p < 0,05$ ) больше соответственно в сравнении с лицами контрольной группы.

У спортсменов интенсивность отдачи кислорода эритроцитами венозной крови составляет  $10,19 \times 10^{-3}$  отн. ед., что на 40,0% выше ( $p < 0,01$ ), чем у лиц, не занимающихся спортом ( $7,27 \times 10^{-3}$  отн. ед.). Также у спортсменов обнаружена прямая корреляционная связь между интенсивностью отдачи кислорода эритроцитами венозной крови и микрополярностью их мембран как в зоне прибежкового липидного окружения, так и в общем липидном фонде (коэффициент корреляции соответственно  $0,35-0,39^*$  и  $0,34-0,40^*$ ,  $p < 0,05$ ).

Содержание ТГ ЛПВП у спортсменов ниже в сравнении с лицами контрольной группы ( $0,014 \pm 0,028$  и  $0,037 \pm 0,045$  ммоль/л,  $p = 0,003$ ). Микровязкость ЛПВП (на 14,16–29,89 %\*\* для аннулярного и на 13,15–27,33 %\*\* для общего липидного фондов,  $p < 0,05$ ) и ЛПОНП (на 87,5–110,6 %\*\* для аннулярного и на 93,5–106,2 %\*\* для общего липидного фондов,  $p < 0,05$ ) спортсменов выше, а прямая корреляционная зависимость микровязкости ЛПВП и ЛПНП с содержанием холестерина носит более выраженный характер, чем у лиц, не занимающихся спортом (коэффициенты корреляции для ЛПВП спортсменов  $0,38-0,57^{**}$ ,  $p < 0,05$ , у лиц контрольной группы статистически значимых

<sup>1</sup>\* в диапазоне концентраций пирена от 1 до 10 мкмоль/л.

\*\* в диапазоне концентраций пирена от 1 до 4 мкмоль/л.

зависимостей не обнаружено; для ЛПНП спортсменов  $0,44-0,64^{**}$ ,  $p < 0,05$  и  $0,33-0,49^{**}$ ,  $p < 0,05$  у лиц контрольной группы). Микрополярность аннулярного и общего липидного фондов ЛПВП, ЛПНП и ЛПОНП у спортсменов выше (на  $3,8-5,9\%^{**}$ ,  $1,5-4,6\%^{**}$  и  $9,5\%$  соответственно,  $p < 0,05$ ), чем у лиц, не занимающихся спортом.

### Список литературы

1. Агарков, Ф. Т. К вопросу о повышении тепловой устойчивости организма человека средствами мышечной тренировки / Ф. Т. Агарков, А. С. Павлов // Косм. биология и медицина. – 1975. – №5. – С.75-80.
2. Бутусова, В. Н. Структурно-функциональные свойства эритроцитарных мембран при дислиппротеинемиях : автореф. дис. ... канд. мед. наук / В. Н. Бутусова. – Новосибирск, 2007. – 24 с.
3. Введение в биомембранологию : учеб. пособие МГУ / А. А. Болдырев [и др.]. – 1990. – 208 с.
4. Гурарий, Е. Я. Пирен как флуоресцентный зонд для оценки полярности пенополиуретановых мембран / Е. Я. Гурарий, С. Г. Дмитриенко, В. К. Рунов // Хим. физика. 1999. – Т. 18. – № 2. – С. 30-35.
5. Дергунов, А.Д. Белок-липидные взаимодействия и функционирование мембраносвязанных ферментов / А. Д. Дергунов, А. С. Капрельянц, Д. Н. Островский // Успехи биол. химии. – 1984. – Т. 25. – С. 89–110.
6. Добрецов, Г. Е. Флуоресцентные зонды в исследовании клеток, мембран и липопротеинов / Г. Е. Добрецов. – М.: Наука, 1989. – 277 с.
7. Исследование механизмов кислородного обмена эритроцитов человека / Э. П. Титовец [и др.] // Биофизика. – 2009. – Т. 10. – С. 425–441.
8. Ишутина, Н. А. Изменение микровязкости мембран эритроцитов крови у беременных, инфицированных вирусом герпеса / Н. А. Ишутина, Н. Н. Дорофиенко, И. А. Андриевская // Бюллетень физиологии и патологии дыхания. – 2006. – Вып. 23. – Прил. – С. 16–17.
9. Коломийцева, А.Г. Липиды сыворотки крови и мембран эритроцитов у беременных с поздними токсикозами / А. Г. Коломийцева, Т. С. Черненко // Акушерство и гинекология. – 1986. – № 4. – С. 22–26.
10. Лоншакова, В. И. Изменение микровязкости мембран эритроцитов и лимфоцитов при почечно-клеточном раке / В. И. Лоншакова // Молодёжь и наука: сборник материалов VI Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных [Электронный ресурс]. – Красноярск: Сиб. федерал. ун-т, 2011. — Режим доступа: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2010/section9.html>.
11. Мельников, Г.В. Влияние полярности микроокружения пирена на интенсивность его твердофазной люминесценции при комнатной температуре / Г.В. Мельников, Т.И. Губина, О.А. Дячук // Журн. физ. химии. – 2006. – Т. 80, № 7. – С. 1319–23.
12. Осочук, С. С. Физико-химические свойства мембран эритроцитов спортсменов циклических видов спорта / С. С. Осочук, А. Ф. Марцинкевич // Вестник Витебского государственного медицинского университета. – 2013. – Т. 12. – № 3. – С. 25-31.
13. Обоснование применения эссенциальных фосфолипидов при хронических заболеваниях печени: динамика электрических и вязкоупругих параметров эритроцитов / С.А. Курилович [и др.] // Эксперим. и клин. гастроэнтерология. – 2010. – № 11. – С. 44–52.
14. Павлов, А. С. Функциональное напряжение организма спортсменов и не спортсменов при различных степенях гипертермии / А. С. Павлов, Т. А. Митрофанова, В. А. Романенко // Материалы VI респ. науч.-теорет. конф. по вопр. физич. воспитания и спорта среди детей и молодежи. – Ташкент : Уз. Медицина, 1977. – Ч. 1. – С. 168–170.
15. Структурное состояние мембранных белков эритроцитов человека при взаимодействии с лигандами  $\beta 1$ -адренорецепторов — добутамином и атенололом / В. В. Жиринов [и др.] // Докл. НАН Украины. – 2008. – № 11. – С. 176–181.
16. Тиц, Н. У. Энциклопедия клинических лабораторных тестов: пер. с англ. – М. : Медицина, 1997. – 960 с.
17. Dodge, J. The preparation and chemical characteristics of hemoglobin free ghosts of erythrocytes / J. Dodge, C. Mitchell, D. Hanahan // Arch Biochem Biophys. –1963. – Vol. 100. – № 1. – P. 119–130.
18. Hicks, M. A spectrophotometric method for the determination of lipid hydroperoxides / M. Hicks, J.M. Gebicki // Anal Biochem. – 1979. – № 99. – P. 249-253.
19. Hochachka, P. W. The brain at high altitude: hypometabolism as a defence against chronic

- hypoxia? / P.W. Hochachka, C.M. Clarc, W.D. Brown // *J Cered-Blood-From-Metab.* – 1994. – Vol. 14. – № 4. – P.671–679.
20. Lakowicz, J.R. *Principles of Fluorescence Spectroscopy* / R. J. Lakowicz. – N.Y. : Springer Science, 2006. – 960 p.
21. Lee, A.G. Lipid-protein interactions in biological membranes: a structural perspective / A.G. Lee // *Biochimica et Biophysica Acta Biomembranes.* – 2003. – Vol. 1612. – P. 1–40.
22. The R Project for Statistical Computing [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.r-project.org/>. – Date of access : 20.04.2013.
23. Whitcomb, R.W. Effects of long-chain, saturated fatty acids on membrane microviscosity and adrenocorticotropin responsiveness of human adrenocortical cells in vitro / R.W. Whitcomb, W.M. Linehan, R.A. Knazek // *J Clin Invest.* – 1988. – № 81(1). – P. 185–188.
- References**
1. Agarkov F.T., Pavlov A.S. K voprosu o povыshenii teplovoj ustojchivosti organizma cheloveka sredstvami my'shechnoj trenirovki [To the question of increasing the thermal stability of the human body by means of muscle training]. *Kosm. biologiya i medicina* [Cosm. biology and medicine]. 1975, no. 5, pp. 75-80. (In Russian)
  2. Butusova V.N. *Strukturno-funkcional'ny'e svoystva e`ritrocitarny`kh membran pri dislipoproteinemiyakh* [Structural and functional properties of erythrocyte membranes in dyslipoproteinemias]. Abstract of Ph. D. thesis. Novosibirsk, 2007, 24 p. (In Russian)
  3. Boldyrev A.A. et al. *Vvedenie v biomembranologiyu* [Introduction to biomembranology: textbook]. Manual of Moscow State University. 1990, 208 p. (In Russian)
  4. Gurary E.Ya., Dmitrienko S.G., Runov V.K. Piren kak fluorescenny`j zond dlya ocenki polyarnosti penopoliure-tanovy`kh membran [Pyrene as a fluorescent probe for evaluating the polarity of polyurethane foam membranes]. *Khimicheskaya fizika* [Khim. Physics]. 1999. T. 18, no. 2, pp. 30-35. (In Russian)
  5. Dergunov A.D., Kaprelyants A.S., Ostrovsky D.N. Belok-lipidny`e vzaimodejstviya i funkcionirovanie membranovyyazanny`kh fermentov [Protein-lipid interactions and functioning of membrane-bound enzymes]. *Uspekhi biologicheskoy khimii* [Successes of biol. Chemistry]. 1984. T. 25, pp. 89–110. (In Russian)
  6. Dobretsov G.E. *Fluorescenny`e zondy` v issledovanii kletok, membran i lipoproteinov* [Fluorescent probes in the study of cells, membranes and lipoproteins]. M.: Nauka, 1989, 277 p. (In Russian)
  7. Titovets E.P. et al. Issledovanie mekhanizmov kislorodnogo obmena e`ritrocitov cheloveka [Study of the mechanisms of oxygen metabolism in human erythrocytes]. *Biofizika* [Biophysics]. 2009. T. 10, pp. 425–441. (In Russian)
  8. Ishutina N.A., Dorofienko N.N., Andrievskaya I.A. Izmenenie mikrovyazkosti membran e`ritrocitov krovi u beremenny`kh, inficirovanny`kh virusom gerpesa [Changes in the microviscosity of erythrocyte membranes in pregnant women infected with the herpes virus]. *Byulleten` fiziologii i patologii dy`khaniya* [Bul. Physiol. and patol. Breathing]. 2006. Issue. 23. App., pp. 16–17. (In Russian)
  9. Kolomiytseva A.G., Chernenko T.S. Lipidy` sy`vorotki krovi i membran e`ritrocitov u beremenny`kh s pozdnimi toksikozami [Lipids of blood serum and erythrocyte membranes in pregnant women with late toxicosis]. *Akusherstvo i ginekologiya* [Obstetrics and gynecology]. 1986, no. 4, pp. 22–26. (In Russian)
  10. Lonshakova V. I. Izmenenie mikrovyazkosti membran e`ritrocitov i limfocitov pri pochechno-kletochnom rake [Changes in the microviscosity of erythrocyte and lymphocyte membranes in renal cell carcinoma]. *Molodyozh` i nauka* [Youth and Science: collection of materials of the VI All-Russian. sci-tech. conf. students, graduate students and young scientists] (In Russian). Krasnoyarsk: Sib. Federal. State Un., 2011. Available at: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2010/section9.html>.
  11. Melnikov G.V., Gubina T.I., Dyachuk O.A. Vliyanie polyarnosti mikrookruzheniya pirena na intensivnost` ego tverdogaznoj lyuminescenczii pri komnatnoj temperature [Influence of the polarity of the pyrene microenvironment on the intensity of its solid-phase luminescence at room temperature]. *Zhurn. fiz. khimii* [J. physical chemistry]. 2006. T. 80, no. 7, pp. 1319–23. (In Russian)
  12. Osochuk S.S., Martsinkevich A. F. Fiziko-khimicheskie svoystva membran e`ritrocitov

- sportsmenov cziklicheskikh vidov sporta [Physical and chemical properties of erythrocyte membranes in athletes of cyclic sports]. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo mediczinskogo universiteta* [Bulletin of the Vitebsk State Medical University]. 2013. T. 12, no.3, pp. 25-31. (In Russian)
13. Kurilovich S.A. et al. Obosnovanie primeneniya e'ssenczial'ny'kh fosfolipidov pri khronicheskikh zabolevaniyakh pecheni: dinamika e'lektricheskikh i vyazkouprugikh parametrov [Rationale for the use of essential phospholipids in chronic liver diseases: dynamics of electrical and viscoelastic parameters of erythrocytes]. *E'ksperim. i klin. gastroe'nterologiya* [Experiment. and clinical. Gastroenterol.]. 2010, no.11, pp. 44–52. (In Russian)
  14. Pavlov A.S., Mitrofanova T.A., Romanenko V.A. Funkczional'noe napryazhenie organizma sportsmenov i ne sportsmenov pri razlichny'kh stepenyakh gipertermii [Functional voltage body of athletes and non-athletes at various degrees of hyperthermia]. *Materialy` VI resp. nauch.-teoret. konf. po vopr. fizich. vospi-taniya i sporta sredi detej i molodezhi* [Materials of the VI rep. scientific-theor. conf. according to the question physical education and sports among children and youth]. Tashkent: Uz. Medicine, 1977. Part 1, pp. 168-170. (In Russian)
  15. Zhirnov V.V. et al. Strukturnoe sostoyanie membranny'kh belkov e'ritrocitov cheloveka pri vzaimodejstvii s ligandami  $\beta$ 1-adrenoreczptorov — dobutaminom i atenololom [Structural state of membrane proteins of human erythrocytes during interaction with ligands of  $\beta$ 1-adrenergic receptors – dobutamine and atenolol]. *Doklad NAN Ukrayini* [Dokl. NAS of Ukraine]. 2008, no.11, pp. 176-181.
  16. Tits N.U. *E'ncziklopediya klinicheskikh laboratorny'kh testov* [Encyclopedia of clinical laboratory tests: Translation from English]. M. : Medicine, 1997. 960 p. (In Russian)
  17. Dodge J., Mitchell C., Hanahan D. The preparation and chemical characteristics of hemoglobin free ghosts of erythrocytes. *Arch Biochem Biophys.* 1963. Vol. 100, no. 1, pp. 119–130.
  18. Hicks M., Gebicki J.M. A spectrophotometric method for the determination of lipid hydroperoxides. *Anal Biochem.* 1979, no. 99, pp. 249-253.
  19. Hochachka P.W., Clarc C.M., Brown W.D. The brain at high altitude: hypometabolism as a defance against chronic hypoxia? *J Cered-Blood-From-Metab.* 1994. Vol. 14, no. 4, pp.671–679.
  20. Lakowicz J.R. *Principles of Fluorescence Spectroscopy.* N.Y. Springer Science, 2006, 960 p.
  21. Lee A.G. Lipid-protein interactions in biological membranes: a structural perspective. *Biochimica et Biophysica Acta Biomembranes.* 2003. Vol. 1612, pp. 1–40.
  22. The R Project for Statistical Computing Available at: <http://www.r-project.org/>. (accessed: 20.04.2013).
  23. Whitcomb R.W., Linehan W.M., Knazek R.A. Effects of long-chain, saturated fatty acids on membrane microviscosity and adrenocorticotropin responsiveness of human adrenocortical cells in vitro. *J Clin Invest.* 1988, no. 81(1), pp. 185–188.

*Received 18 March 2022*