

На правах рукописи



Бочарин Иван Владимирович

**ФУНКЦИОНАЛЬНО-МЕТАБОЛИЧЕСКИЙ ОТВЕТ
НА СТАНДАРТНУЮ ФИЗИЧЕСКУЮ НАГРУЗКУ В ОЦЕНКЕ
АДАПТИВНЫХ РЕАКЦИЙ ОРГАНИЗМА**

1.5.5 – физиология человека и животных

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Челябинск – 2024

Работа выполнена на кафедре «Физиология, биохимия животных и акушерство» ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный агротехнологический университет»

Научный руководитель: **Мартусевич Андрей Кимович**, доктор биологических наук, доцент, профессор кафедры «Физиология, биохимия животных и акушерство», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный агротехнологический университет»

Официальные оппоненты: **Похачевский Андрей Леонидович**, доктор медицинских наук, доцент, профессор кафедры «Нормальная физиология», ФГАОУ ВО «Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет)»

Кудря Ольга Николаевна, доктор биологических наук, доцент, профессор кафедры естественно-научных дисциплин, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет физической культуры и спорта».

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет физической культуры»

Защита состоится 31 мая 2024 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.437.08, созданного на базе ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ауд. 1001.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», а также на сайте <https://www.susu.ru/ru/dissertation/24243708/bocharin-ivan-vladimirovich>

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р биол. наук



П.А. Байгужин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Изучение состояния адаптационных резервов организма на основании применения различных исследовательских методик является одной из классических тем физиологии. В рамках адаптации к физическим нагрузкам у различных групп населения, в том числе студенческой молодежи принципиально важно исследование функционального состояния сердечно-сосудистой системы с учетом вегетативного обеспечения деятельности (Шлык, 2009; Caldarone et al., 2017). Кроме того, необходимо осуществлять мониторинг окислительного метаболизма и интенсивности свободнорадикального окисления для предотвращения процессов дезадаптации и функционального дефицита (Гунина Л., 2013, Ames V.N., 1999; Dizgaroglu M. et. al., 2002). Известно, что воздействие физических упражнений считается одним из основных средств поддержания оптимального функционального состояния организма, улучшения физической работоспособности и системной адаптации, одновременно являясь формой физиологического стресса и запуская проадаптивные процессы (Britton et. al., 2007; Pierpont, 2013; Da Palma et al., 2015; Queiroz, et. al., 2015; Jaenisch et. al., 2017). При этом, организм способен компенсировать недостаточно оптимальную работу любого звена регуляторной системы для оптимизации работы организма, однако для обеспечения жизненных процессов в данном случае будут использоваться резервные возможности, что характеризует высокую степень напряжения в поддержании гомеостаза (Баевский с соавт., 2009; Long et al., 2018). Кроме того, у скелетной мускулатуры в процессе сокращения имеется способность значительно увеличивать потребление кислорода, что приводит к интенсификации процессов свободнорадикального окисления. Следовательно, необходимо учитывать возможность разнонаправленных изменений, связанных с вариабельностью в последовательности включения соответствующих защитных механизмов. Это приводит к исчерпанию ресурсов антиоксидантной системы, поэтому требуется анализ показателей окислительного гомеостаза при различных функциональных состояниях организма (Гунина Л., 2013, Stadtman, 2001, Fukai T., Ushio-Fukari M., 2011, Andrianstsitohaina R., et. al., 2012).

Отмечено, что изучение регуляторных систем можно проводить на основании анализа системной гемодинамики и вариабельности сердечного ритма, которые позволяют систематизировать анализ процессов функционального состояния регуляторных систем и верифицировать различные механизмы регуляции организма (Парин С.Б. с соавт., 2014, Полевая С.А. с соавт., 2019), а также показателей окислительного метаболизма. Это позволяет систематизировать информацию об адаптивных возможностях организма, предложить индивидуальный подход в учебно-тренировочном процессе на основании полученных данных.

В настоящее время важнейшим направлением государственной программы Российской Федерации является укрепление здоровья студенческой молодежи в период образовательного процесса (Постановление Правительства РФ от 30.09.2021 № 1661 «Развитие физической культуры и спорта», 2021; Постановление Правительства РФ от 26.12.2017 № 1640 «Развитие здравоохранения», 2017). Однако, их состояние здоровья продолжает ухудшаться вследствие неправильного образа жизни, постоянно увеличивающегося объема учебных нагрузок и снижения двигательной активности (Гурьянов с соавт., 2021; Мартусевич, Жукова, 2011; Semlitsch et al., 2013). Установлено, что с увеличением курса обучения наблюдается

значительное снижение двигательной активности студентов из-за окончания периода обучения по дисциплине «физическая культура и спорт» (Горелов с соавт., 2011; Yukishita et al., 2010), что отражается в ухудшении работы регуляторных систем и снижении уровня адаптационных механизмов. С указанных позиций, требуется контроль состояния здоровья студенческой молодежи путем оценки адаптивных резервов организма обучающихся. Это определило цель исследования.

Цель исследования: оценить функционально-метаболические резервы адаптации организма на основании изучения особенностей гемодинамического ответа и реакции окислительного метаболизма крови на стандартную физическую нагрузку.

Задачи работы:

1. Определить состояние гемодинамики и вариабельности сердечного ритма студентов при воздействии физических нагрузок различной мощности и изучить восстановительные процессы после них.

2. Оценить интенсивность свободнорадикального окисления и активность антиоксидантной системы крови в условиях стандартной физической нагрузки.

3. Охарактеризовать основные типы реактивности гемодинамики организма студентов в течение постнагрузочного периода.

4. Обосновать интегративный показатель адаптивных резервов организма, учитывающий показатели гемодинамики, вариабельности сердечного ритма и окислительного метаболизма, и изучить его динамику при стандартных физических нагрузках.

5. Установить особенности адаптивных резервов организма студенческой молодежи по параметрам гемодинамики и состояния про- и антиоксидантных систем крови с учетом продолжительности обучения.

Научная новизна. Показано, что упражнения комплекса «ГТО» способны выступать в качестве тест-стрессора для мониторинга адаптивных резервов гемодинамики и окислительного метаболизма, при этом наиболее существенные сдвиги среди выбранных упражнений комплекса вызывают бег на 100 м и подтягивание из виса на перекладине. По характеру срочной адаптации к физической нагрузке и восстановительных процессов на основании кластерного анализа параметров гемодинамики и вариабельности сердечного ритма выделены 3 категории студентов. При реакции организма на нагрузочный комплекс первый кластер (40 %) включает студентов с умеренной симпатикотонией и угнетением автономного контура регуляции, во втором кластере отмечаются разнонаправленные колебания ударного объема и частоты сердечных сокращений, с сохранением централизации сердечного ритма, а в третьем кластере (35,7 %) наблюдаются испытуемые с резким напряжением регуляторных систем и снижением функционального состояния. В постнагрузочном периоде в первый кластер включены лица, имеющие высокие адаптационные резервы (51,4 %), ко второму кластеру отнесены обучающиеся с показателями на границе адаптации/дезадаптации (15,7 %), а третий кластер включает лиц с напряжением адаптационных механизмов (32,9 %). Установлено, что дифференциация адаптивного и дезадаптивного ответа на физическую нагрузку возможна по парным диаграммам показателей гемодинамики и вариабельности сердечного ритма и динамике функционально-метаболического показателя.

Для комплексной характеристики адаптационных резервов организма разработан функционально-метаболический параметр, основанный на показателях

системной гемодинамики, вариабельности сердечного ритма и окислительного метаболизма, и верифицированный с использованием корреляционно-регрессионного анализа.

Установлено, что в процессе обучения (с 1 по 3 курсы) адаптивные резервы сердечно-сосудистой системы постепенно снижаются (доля лиц с признаками дезадаптации повышается с 10,5 до 21,5% соответственно), однако в покое большинство из оцениваемых показателей оставались в пределах возрастной нормы. Выявлено, что у третьекурсников наблюдается напряжение регуляторных механизмов по статистическим и спектральным показателям, что сопрягается со сдвигами окислительного метаболизма в сторону окислительного стресса, частично компенсированного антиоксидантными системами.

Теоретическая и практическая значимость работы. Используемый в работе подход к оценке динамики параметров состояния сердечно-сосудистой системы в восстановительном постнагрузочном периоде может быть использован в качестве способа исследования адаптационного потенциала и функциональных резервов организма. Сформированная технология изучения реактивности системной гемодинамики и вариабельности сердечного ритма на стандартную физическую нагрузку (сочетание упражнений комплекса ГТО) позволяет оценить адаптивность ответа на нее, и может быть использована для оценки готовности к занятиям физической культурой, а также профессионального отбора к различным видам деятельности, сопряженным с интенсивными физическими нагрузками. Разработанный интегральный параметр – функционально-метаболический показатель – может быть использован для тестирования адаптивных резервов организма у студенческой молодежи (18-21 год). Кроме того, исследование позволило доказать диагностическую информативность системы спортивного тестирования «MedicalSoft» для оценки состояния гемодинамики и вариабельности сердечного ритма.

Положения, выносимые на защиту:

1. Стандартная физическая нагрузка вызывает существенное, зависящее от ее мощности изменение параметров функционирования сердечно-сосудистой системы и баланса про- и антиоксидантных систем крови. Характер и выраженность этих сдвигов непосредственно определяются адаптационными резервами организма.

2. Функционально-метаболическое тестирование, основанное на использовании упражнений комплекса ГТО, позволяет выявить адаптационные резервы сердечно-сосудистой системы и возможности компенсации сдвигов окислительного метаболизма, установить тип гемодинамического ответа на стандартную физическую нагрузку и оценить скорость и полноценность восстановительных процессов.

3. Гемодинамические показатели, параметры вариабельности сердечного ритма и окислительного метаболизма крови студентов сохраняются в физиологических пределах, но прогрессивно смещаются в область пограничных значений при увеличении продолжительности обучения в ВУЗе (с 1 по 3 курс), что демонстрирует снижение адаптационных резервов.

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность и обоснованность результатов диссертационного исследования подтверждаются корректной выборкой испытуемых, использованием сертифицированных программно-аппаратных комплексов, а также методов статистической обработки полученных данных. Основные результаты диссертации доложены и обсуждены на

XIV международной научной конференции «Системный анализ в медицине» (Благовещенск, 2020), на Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Актуальные вопросы научно-методического обеспечения системы подготовки спортивного резерва в Российской Федерации (Казань, 2020), на XXVIII Всероссийской конференции молодых ученых с международным участием «Актуальные проблемы биомедицины» (Санкт-Петербург, 2022), на IX Международной научно-практической конференции «Безопасный спорт – 2022» (Санкт-Петербург, 2022) и на IX Российской с международным участием, конференции по управлению движением, посвященной 95-летию со дня рождения И.Б. Козловской «Motor control – 2022» (Казань, 2022).

Внедрение. Материалы диссертационной работы внедрены в учебный процесс кафедр физической культуры и спорта, нормальной физиологии им. Н.Ю. Беленкова, биохимии им. Г.Я. Городисской Приволжского исследовательского медицинского университета, факультета физической культуры и спорта Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и кафедр физического воспитания, зоологии и физиологии Алтайского государственного университета.

Публикация результатов исследования.

По материалам диссертации опубликовано 20 научных работ, из них 13 – в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 7 – в рецензируемых научных изданиях, а также сборниках научных трудов Всероссийских и Международных конференций.

Объем и структура диссертации.

Текст диссертации изложен на 165 страницах, состоит из введения, обзора литературы, материалов и методов исследования, 2 глав с изложением результатов собственных исследований, обсуждения результатов, выводов, и списка литературы. Список литературы включает 288 источников, в том числе 148 - отечественных и 140 - зарубежных авторов. Диссертация содержит 15 таблиц и 49 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Материал и методы исследования

Общий объем исследований и формирование групп обследуемых. Исследование выполнено на базе Нижегородского государственного агротехнологического университета, Приволжского исследовательского медицинского университета и Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

В исследовании приняли участие практически здоровые студенты мужского пола в возрасте 18-21 год, у которых, по результатам периодического медицинского осмотра, установлена основная и подготовительная группа для занятий физической культурой и спортом. В группу включали некурящих студентов с умеренным режимом двигательной активности и индексом массы тела в пределах 18,2-23,8 кг/м². Все обучающиеся, включенные в исследование, подписывали информированное согласие на участие в нем. Первоначально, дополнительно уточнялась оценка согласованности результатов гемодинамических индикаторов, полученных разными методами, с построением диаграмм Бленда-Алтмана (Bland J.M., Altman D.G., 1986, рис. 1). Для этого отбирали 100 студентов совокупной выборки и определялись средняя по паре измерений, ее нижняя и верхняя границы (по оси абсцисс) и абсолютная погрешность (по оси ординат). Представлены наиболее информативно отражающие эти различия параметры – ЧСС и ОПСС. Среднее значение абсолютной погрешности для ЧСС равно -0,4 уд/мин, (95% ДИ от

-0,65 до -0,14), а для ОПСС это значение составило -6,89 дин·с·см⁻⁵ (95% ДИ от -8,6 до -5,2). Ожидаемые максимальные отклонения измерений не будут превышать 0,1 уд/мин для ЧСС и 0,9 дин·с·см⁻⁵ для ОПСС (исходя из расчета среднеквадратичного отклонения средней разницы двух измерений). Отрицательные значения абсолютных погрешностей показывают ожидание незначительно меньших результатов при измерении с помощью прибора. Практически все значения на графике наблюдаются в пределах доверительных границ, что позволяет сделать вывод о достаточной валидности используемого комплекса «Система спортивного тестирования MedicalSoft».

В рамках первого этапа исследования сформировали группу студентов основной группы (n=70), у которых производили анализ показателей гемодинамики, вариабельности ритма сердца и окислительного метаболизма в состоянии физиологического покоя и затем – на стандартную физическую нагрузку в виде 5 упражнений комплекса «Готов к труду и обороне» («ГТО»). При этом, выбраны упражнения, которые в соответствии со ступенями структуры Всероссийского физкультурно-спортивного комплекса «ГТО» позволяют оценить уровень развития физических качеств и прикладных двигательных умений и навыков (координационных способностей, скоростных и силовых возможностей) в условиях ауксотонического режима работы скелетных мышц (Методические рекомендации Министерства спорта РФ «По организации и выполнению нормативов испытаний Всероссийского физкультурно-спортивного комплекса «ГТО»; Павленкович С.С., 2019; Погодин В.В., 2016).

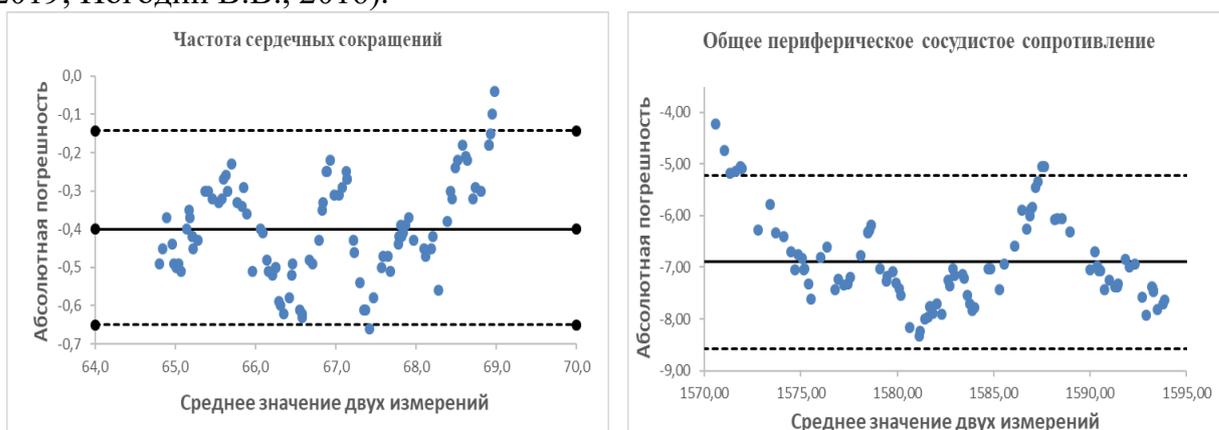


Рисунок 1 – Диаграммы Бленда-Алтмана для абсолютных погрешностей измерений частоты сердечных сокращений и общего периферического сосудистого сопротивления

Проводили кластерный анализ изучаемой группы в течение выполнения физических упражнений для оценки процессов срочной адаптации организма, и в постнагрузочном периоде для определения уровня восстановительных процессов в исследуемой группе. Изучали гемодинамическую дифференциацию изучаемых лиц по реактивности к физической нагрузке на основании двумерного анализа. Выполняли корреляционно-регрессионный анализ полученных данных, позволяющий оценить взаимосвязи между полученными показателями, и верифицировать формулу для калькуляции функционально-метаболического параметра, как интегративного маркера адаптационных резервов организма. В рамках этого этапа исследования показаны особенности функционально-метаболического статуса студентов, которые могут быть использованы для

профессионального отбора и мониторинга функциональной готовности студентов к занятиям физической культурой, а также интенсивным физическим тренировкам (табл. 1).

На втором этапе проводили скрининг состояния системной гемодинамики, вариабельности сердечного ритма и окислительного метаболизма крови большого контингента студентов основной и подготовительной групп (n=438) в состоянии физиологического покоя, дифференцированных на 1, 2 и 3 курсы обучения.

Таблица 1 – Этапы исследования и объем изученного материала

Этапы исследования	Объем	Методы исследования
Формирование контингента испытуемых студентов	2137 человек	Ретроспективное исследование, обработка документации для установления группы для занятий физической культурой
Формирование группы испытуемых 1, 2 и 3 курса	438 человек	Проспективное исследование
Оценка функционального состояния организма при воздействии стандартной физической нагрузки, а также в постнагрузочном периоде	70 человек	Исследование параметров системной гемодинамики, вариабельности сердечного ритма и окислительного метаболизма в процессе нагрузочного тестирования (система спортивного тестирования «MedicalSoft», упражнения комплекса «ГТО»), кластерный анализ методом К-средних
Оценка уровня адаптационных резервов сердечно-сосудистой системы на основе дифференциации студентов по реактивности к физической нагрузке	70 человек	Исследование и парное сравнение показателей системной гемодинамики, вариабельности сердечного ритма после воздействия стандартной физической нагрузки с использованием двумерного анализа (программное обеспечение «система спортивного тестирования «MedicalSoft», программа «Graph»)
Верификация формулы для расчета ФМП	70 человек	Проведение корреляционно-регрессионного анализа показателей системной гемодинамики, вариабельности сердечного ритма и окислительного метаболизма
Оценка функционального состояния сердечно-сосудистой системы с помощью тонометрического и аппаратного способов	438 человек	Исследование системной гемодинамики студентов 1, 2 и 3 курса с помощью расчетов по общепринятым формулам, а также с применением программно-аппаратного способа (программное обеспечение система спортивного тестирования «MedicalSoft»)
Оценка окислительного метаболизма и определение интегрального уровня адаптационных резервов	438 человек	Исследование биохимических показателей крови и расчет интегрального функционально-метаболического параметра у студентов 1,2 и 3 курса с помощью верифицированной формулы

При этом использовались 3 подхода: тонометрический (определение артериального давления и частоты сердечных сокращений с последующим расчетом гемодинамических показателей, используя общепринятые формулы, а также калькуляции адаптационного потенциала), аппаратный (с использованием системы спортивного тестирования «MedicalSoft», в том числе – с определением статистических и спектральных показателей вариабельности сердечного ритма) и

биохимический (оценка состояния окислительного метаболизма и активности антиоксидантных ферментов).

Тонометрический способ исследования показателей системной гемодинамики. Определяли антропометрические показатели сформированных групп студентов (длина, масса тела) с использованием стандартных наборов инструментов, прошедших метрический контроль. Измерение АД и ЧСС осуществлялось с помощью автоматического тонометра «Omron M2 Basic» («Omron Healthcare Co., Ltd.», Япония). Измерение проводилось в положении сидя с соблюдением стандартных условий определения АД. Затем осуществлялся расчет значения площади поверхности тела (по формуле Мостеллера), а также следующих параметров: УО (по формуле Старра), СВ, СрАД (по формуле Хикема), ОПСС (по формуле Пуазейля), ПД, СИ, (Калабин О.В., 2018; Свердлов Ю.С., 2014; Спицин А.П. с соавт., 2018), характеризующих системную гемодинамику. На основании полученных данных осуществляли калькуляцию адаптационного потенциала (АП).

Аппаратный способ исследования показателей системной гемодинамики. У сформированных групп студентов производили оценку системной гемодинамики с использованием программно-аппаратного комплекса «Система спортивного тестирования «MedicalSoft» (вариант MS FIT-01, Москва). Следует отметить, что данное оборудование соответствует действующим российским и международным стандартам, что подтверждается международной декларацией о соответствии (регистрационный номер ЕАЭС N RU от 26.07.2018). Кроме того, качество данного оборудования было подтверждено международными сертификатами CE Medical и ISO 13485:2016. В компьютерную базу вводились данные каждого испытуемого (возраст, длина и масса тела, объем талии и бедер, значение АД), затем программа выполняла обработку данных и визуализировала на экран персонального компьютера следующие показатели системной гемодинамики: УО, СВ, ЧСС, ОПСС, СИ, ПД и LVSW. Измерение выполнялось в спокойной обстановке при температуре воздуха 20-22⁰С и относительной его влажности 45-55 %.

Оценка вариабельности сердечного ритма. Запись пульсограммы осуществлялась с использованием программно-аппаратного комплекса «Система спортивного тестирования «MedicalSoft» (вариант MS FIT – 01, Москва, Россия). Исследование показателей ВНС проводилось в положении сидя, в спокойной обстановке, в дневные часы, при температуре воздуха 20-22⁰С с соблюдением стандартных условий регистрации кардиоинтервалограммы. Объем анализируемой выборки одного испытуемого при каждой регистрации составлял 256 кардиоциклов. Оценка вариабельности сердечного ритма осуществляли по интервалам R-R с помощью алгоритма, основанного на подсчете числа пересечений нуля для обнаружения комплексов QRS, которая используется в работе программно-аппаратного комплекса. BCP оценивалась с помощью статистических (SDNN, pNN50, SI), а также спектральных (TP, LF, HF, VLF, LF/HF) показателей.

Оценка свободнорадикальных процессов и состояния антиоксидантной системы крови. У студентов, включенных в данную группу (n=70), медицинским работником осуществлен забор образцов крови из локтевой вены (2 мл.). Для оценки интенсивности процессов ПОЛ использовали биохемиллюминетр БХЛ-07, позволяющий исследовать кинетические кривые Fe-индуцированной биохемиллюминесценции. В качестве основных параметров использовали показатели I_{max} (как критерий способности биообъекта к окислению) и 1/S (как критерий общей антиоксидантной активности биосубстрата). Также оценивали концентрацию

ТБК-активных продуктов, в том числе МДА в плазме крови и эритроцитах. Образцы биологических жидкостей инкубировали при температуре 95°C в течение 30-60 минут, затем охлаждали и центрифугировали в течение 10 минут при 3000 об/мин на центрифуге 80-2С. Оптическую плотность измеряли на спектрофотометре ПЭ-5300ВИ (Россия) при длине волны 532 нм. Состояние АОС дополнительно характеризовали по активности ферментов, катализирующих утилизацию свободных радикалов. Активность СОД изучали с применением спектрофотометрического метода Т.В. Сирота (1999) ингибирования ферментом аутоокисления адреналина в адренохром в условиях генерации супероксидного анион-радикала в щелочных условиях при длине волны 347 нм. Активность каталазы методом Aeble (1952) определяли по снижению концентрации пероксида водорода в результате действия фермента. Применяли низкую концентрацию пероксида водорода по изменению оптической плотности при 240 нм, так как его насыщенная концентрация ингибирует фермент. В этих экспериментах использовали спектрофотометр ПЭ-5300ВИ.

Расчет интегрального параметра адаптационных резервов организма.

На основании гемодинамических параметров, показателей ВСР, окислительного метаболизма и поправочных коэффициентов, предложена формула для расчета интегрального коэффициента уровня функциональных резервов организма – *функционально-метаболический параметр (ФМП)*.

$$\text{ФМП} = (1/S + \text{СОД}/100 + \text{МДА} + \text{I}_{\text{max}}) -$$

$$(100/\text{ЧСС} + \text{УО}/100 + 100/\text{ОПСС} + 100/\text{ТР} + 1/\text{pNN50})$$

Данная формула составлена на основании наиболее информативных параметров окислительного метаболизма, которые отражают интенсивность свободнорадикальных процессов (концентрация МДА и максимальная интенсивность вспышки хемиллюмесценции) и состояние антиоксидантной системы (активность супероксиддисмутазы и общую активность данной системы). Кроме того, нами были учтены показатели системной гемодинамики, характеризующие насосную функцию сердца (УО и ЧСС) и тонус сосудов (ОПСС), а также индикаторы тонуса вегетативной нервной системы на основании анализа вариабельности сердечного ритма (общая мощность спектра и параметр pNN50).

Точность данной формулы оценивали с помощью регрессионного анализа.

Статистическая обработка данных.

Материал, полученный при проведении исследований, обработан методом вариационной статистики (Наследов А.Д., 2004). Результаты представлены в виде средней величины (M), и стандартной ошибки среднего (m). Проверка на нормальность распределения выборки осуществлялась с использованием критерия Колмогорова-Смирнова с поправкой Лиллиефорса. Количество кластеров определяли при помощи иерархической кластеризации с построением дендрограммы. Для устранения влияния различий параметров использовали уравнивание составов совокупностей с расчетом стандартизованных коэффициентов. Кластерный анализ для распределения студентов по группам осуществляли с помощью метода К-средних с Евклидовым расстоянием между центроидами и ближайшими точками. Статистические взаимосвязи между полученными параметрами определяли с помощью корреляционного анализа. Для верификации уравнения для расчета ФМП применяли уравнение линейной регрессии. Отличия считали статистически значимыми при значениях $p < 0,05$ (по t-

критерию Стьюдента). Математический анализ и статистическая обработка данных проведены с использованием программ Microsoft Excel 2016, Statistica 10.0.

Результаты собственных исследований и их обсуждение

1. Исследование состояния системной гемодинамики студентов в условиях стандартной физической нагрузки

Актуальность представляют поиски механизмов исследования адаптационного ответа организма и его функциональной готовности к выполнению испытаний комплекса «ГТО». Исходя из этого, в рамках первого этапа изучалась реакция сердечно-сосудистой системы и окислительного метаболизма студентов на предложенную нагрузку с использованием следующих упражнений: прыжок в длину с места, подъем и опускание туловища из положения лежа, челночный бег 3 отрезка по 10 метров, бег на 100 метров и подтягивания из виса на перекладине в количестве 15 ± 5 повторений.

Таблица 2 – Показатели системной гемодинамики и вариабельности сердечного ритма у студентов в состоянии покоя и при воздействии физических нагрузок (n=70), $M \pm m$

Показатель, ед. измерения	Покой	Прыжок в длину	Скручивания корпуса	Челночный бег	Бег 100м	Подтягивания
САД, мм.рт.ст.	124,3±13,7	139,6±10,7*#	143,3±11,7*#	146,1±15,9*	149,9±9,5*	148,6±9,2*
ЧСС, уд/мин	73,2±12,4	92,2±10,8*#	119,7±9,4*#	125,9±14,1*#	137,4±10,3*#	133,4±9,6*#
УО, мл	70,6±4,8	76,8±4,7*#	89,8±5,2*#	92,9±5,3*	106,4±5,1*#	101,2±5,8*#
ОПСС, $\text{дин} \cdot \text{с} \cdot \text{см}^{-5}$	1413,5±90,7	1143,8±81,3*#	741,8±89,8*#	687,5±78,6*#	560,2±99,7*#	603,5±92,2*#
pNN50, %	19,4±2,4	15,2±1,9*#	14,5±1,8*	11,8±1,9*#	10,3±1,1*#	11,2±1,9*
SDNN, мс	49,8±15,3	43,7±11,1*#	38,5±8,3*#	42,9±12,9*#	32,6±11,6*#	33,8±11,6*
TP, мс^2	1679,5±159,5	1256,8±147,2*#	1037,5±179,5*#	979,4±128,7*#	949,3±139,2*	920,6±158,7*
LF/HF, усл.ед.	1,6±0,7	3,2±0,6*	4,8±0,7*#	5,6±0,6*#	5,9±0,6*	6,2±0,6*#
LF, %	33,3±4,2	33,4±4,4	42,3±4,8*#	44,3±4,8*	46,5±4,3*	46,8±4,5*
HF, %	30,9±4,1	30,8±5,4	18,6±6,1*#	10,6±6,4*#	11,1±5,4*	11,0±4,9*
VLF, %	35,8±4,4	35,8±4,5	39,1±4,1*#	45,1±4,9*#	42,4±4,7*#	42,2±4,2*
SI, усл. ед.	102,4±13,1	185,1±9,7*#	198,5±11,8*#	292,9±11,5*#	436,3±14,9*#	452,1±16,8*#

Примечание: * – $p < 0,05$ по отношению к значениям в состоянии покоя; # – $p < 0,05$ по отношению к значениям предыдущего физического упражнения

Последовательное выполнение серии вышеуказанных упражнений обусловлено необходимостью оценки вегетативных функций в период вработывания в качестве выявления механизмов экстренной мобилизации (Баранова Т.И., 2012). Отдых между упражнениями составлял 5 минут для восстановления алактатных анаэробных резервов в скелетных мышцах и ликвидации кислородного долга (Кутасин А.Н., 2019). Перед физической нагрузкой и после выполнения каждого упражнения у студентов проводили тестирование гемодинамических показателей и ВСР с использованием системы спортивного тестирования

«MedicalSoft» (табл. 2). Первыми были оценены показатели САД, ЧСС, УО и ОПСС. Значение САД значительно увеличилось после выполнения бега на 100 метров и подтягиваний из виса на перекладине (на 20,6 % и 19,5 %). Аналогичный характер изменений был продемонстрирован и по уровню ЧСС (на 87,7 % после 100-метрового бега и на 82,2 % после подтягиваний).

Далее рассматривались параметры, характеризующие насосную функцию сердца и сосудистого сопротивления (УО и ОПСС). Наиболее высокие вариации УО также были отмечены при выполнении бега на 100 метров и подтягиваний (увеличение на 50,7 % и 43,3 % соответственно), а ОПСС статистически значимо снижается, показывая уменьшение тонуса артерий мышечного типа в ответ на усиление выброса крови (на 60,4 % и 57,3 % после бега и подтягиваний). Это отражалось и в особенности реакции статистических параметров ВСП – SDNN и pNN50, которые показали статистически значимое снижение на предложенные нагрузки.

Уменьшение вариабельности кардиоритма становится особенно существенным в ответ на 100-метровый бег и подтягивания из виса на перекладине (снижение SDNN на 34,5 % и 32,1 %, а также pNN50 до значений 10,3 % и 11,2 %). Также, значимые изменения были обнаружены по показателям TP и LF/HF. Вследствие изменения SDNN и pNN50 отмечено уменьшение TP в зависимости от вида предложенных физических упражнений. В то же время LF/HF характеризует усиление симпатической стимуляции кардиоритма по мере выполнения упражнений, значения которого составляли 5,6 усл.ед., после бега на 100 метров и 6,2 усл.ед. после подтягиваний. Таким образом, статистические параметры ВСП отражают изменение регуляторных влияний на ритм сердца. При изучении спектральных параметров ВСП отмечается преобладание LF и VLF компонентов в относительных значениях и снижение значения HF, указывающее смещение вегетативного баланса в сторону преобладания симпатического отдела ВНС. Наблюдалось сохранение автономного контура регуляции сердечного ритма по мере переносимости физических нагрузок, однако после выполнения челночного бега, бега на 100 метров и подтягиваний из виса на перекладине наблюдается тенденция к его угнетению. Анализ SI показал его приближение к пограничному значению в 500 усл. ед. после выполнения бега и подтягиваний, что характеризует значительное влияние физических упражнений. В группе присутствовали испытуемые, у которых адаптивные реакции на нагрузочный тест отражались в увеличении параметра ЧСС при незначительном изменении УО и ОПСС, что провоцировало резкие сдвиги систолического артериального давления. В том числе у них превалировал высокий уровень pNN50, характеризовавший тенденцию к аритмогенным событиям и SI, значение которого сообщало о тенденции к развитию донозологического состояния.

В дополнение к изучению гемодинамики и ВСП, исследовались адаптационные возможности организма студентов на основании оценки интенсивности свободнорадикального окисления и состояния АОС (табл. 3). Для анализа использовали упражнения, вызвавшие существенное напряжение регуляторных систем – бега на 100 метров и подтягиваний из виса на перекладине. В качестве контроля использовали уровень параметров до проведения нагрузочного теста. При анализе Fe-индуцированной хемилюминесценции по показателю I_{max} было установлено усиление темпов генерации АФК в зависимости от мощности нагрузки, а по I/S – угнетение активности АОС под воздействием нагрузочного комплекса.

Кроме того, отмечается увеличение концентрации МДА на 21,1 % в плазме и 14,8 % в эритроцитах после бега, а также на 28,6 % и 15,8 % после подтягиваний, что характеризует интенсификацию цепных реакций свободнорадикального окисления

липидных субстратов. При этом, установлено снижение активности СОД на 11,2 %/14,1 % и каталитических свойств каталазы на 11 %/12,1 % после воздействия этих физических упражнений, что указывает на относительный дисбаланс ПОЛ-АОС.

Наблюдалось также статистически значимое увеличение ФМП при воздействии физических упражнений комплекса ГТО, что, согласно сути критерия, указывает на снижение адаптационных возможностей студентов исследуемой группы (рис. 2). Выраженные изменения функционирования организма по параметрам гемодинамики, вариабельности сердечного ритма и окислительного метаболизма позволяют говорить о целесообразности использования бега на дистанцию 100 м и подтягиваний из виса на перекладине в качестве тестов для оценки адаптационного потенциала системной гемодинамики и метаболизма.

Таблица 3 – Уровень показателей окислительного метаболизма крови у студентов состояния покоя и после физической нагрузки (n=70), М±m

Показатель	Покой	Бег 100м	Подтягивания	P<0,05
I _{max} , МВ	1,23±0,2	1,74±0,4	1,86±0,3	1-2; 2-3; 1-3
1/S	0,056±0,005	0,038±0,004	0,039±0,007	1-2; 1-3
МДА _{эп} , нмоль/мл	6,41±0,6	7,52±0,8	7,61±0,5	1-2; 1-3
МДА _{пл} , нмоль/мл	1,5±0,2	1,9±0,1	2,0±0,2	1-2; 1-3
СОД, ед. ак./г НВ	129,4±3,6	116,2±3,9	111,2±3,7	1-2; 1-3
Каталаза, ед. ак./г НВ	61,1±2,9	54,4±3,1	53,7±2,8	1-2; 1-3

Примечание: P – значимость различий между группами 1, 2, 3.

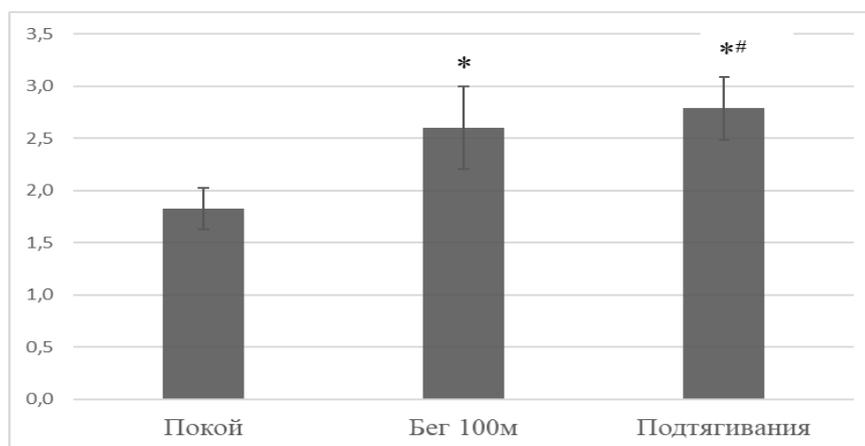


Рисунок 2 – Функционально-метаболический параметр у студентов в состоянии покоя и после физической нагрузки (* - p<0,05 по отношению к значению в покое; # - p<0,05 по отношению к значению после бега 100м)

2. Кластерный анализ методом K-средних в оценке показателей системной гемодинамики и вариабельности сердечного ритма студентов во время реакции на упражнения комплекса ГТО и в постнагрузочном периоде

С учетом адаптационных перестроек организма при воздействии физических упражнений нагрузочного комплекса актуальным представляется выполнение кластерного анализа для разделения студентов на группы по степени выраженности реакции на стресс-фактор в виде физических нагрузок в течение периода срочной адаптации. Для этого использовали показатели системной гемодинамики и ВСР, которые были стандартизированы для уравнивания составов совокупностей. Определили 3 кластера с учетом выраженности реагирования ССС (табл. 4).

У испытуемых первой группы (40 %) наблюдалась умеренная симпатикотония и централизация регуляции ритма сердца, угнетение активности автономного контура с физиологическим увеличением УО и ЧСС и снижением ОПСС для поддержания оптимального уровня артериального давления. Это сопровождается активацией вазомоторного центра в процессе экстренной мобилизации организма и умеренным напряжением его регуляторных систем. Однако у студентов третьей группы (35,7 %) можно отметить выраженное преобладание симпатической регуляции, резкое увеличение активности центрального контура регуляции вегетативных функций. Это проявляется в значительном снижении статистических параметров ВСР, преобладании вазомоторных волн и резком уменьшении общей мощности спектра, высоком значении ЧСС, наличием вазоконстрикции сосудов по показателю ОПСС и резким повышением АД.

Таблица 4 – Количество испытуемых и значения показателей гемодинамики и variability сердечного ритма в кластерах во время реакции организма на физические нагрузки (n=70), M±m

Параметр	1 кластер (n=28)	2 кластер (n=17)	3 кластер (n=25)	P<0,05
LF (%)	-0,31±0,19	-1,08±0,28	1,07±0,46	1-2; 2-3; 1-3
HF (%)	-0,14±0,34	1,56±0,39	-0,91±0,19	1-2; 2-3; 1-3
VLF (%)	-0,23±0,39	-1,24±0,43	1,1±0,31	1-2; 1-3
SDNN	0,09±0,34	1,38±0,56	-1,03±0,28	1-2; 2-3; 1-3
pNN50	0,26±0,19	1,26±0,42	-1,15±0,31	1-2; 2-3; 1-3
TP	0,18±0,36	1,32±0,16	-1,09±0,43	1-2; 2-3; 1-3
LF/HF	-0,71±0,48	-0,51±0,36	1,15±0,51	2-3; 1-3
УО	0,09±0,22	1,36±0,44	-1,02±0,52	1-2; 2-3; 1-3
ОПСС	-0,18±0,24	-1,31±0,29	1,09±0,42	1-2; 2-3; 1-3
ЧСС	-0,43±0,15	-1,08±0,24	1,21±0,37	1-2; 2-3; 1-3

Примечание: P – значимость различий между группами 1, 2, 3.

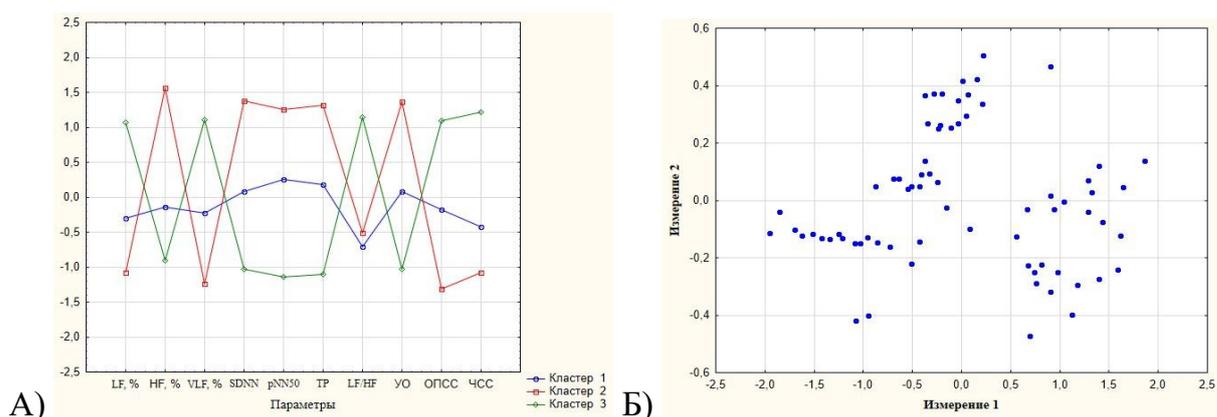


Рисунок 3 – График средних показателей гемодинамики и variability сердечного ритма во время реакции организма на физические нагрузки (А) и диаграмма рассеяния (Б) кластерного анализа для них

Это указывало на снижение функционального состояния систем регуляции и состояние вегетативной дисфункции. У обучающихся второй группы (24,3 %) отмечался рост ЧСС, разнонаправленные колебания УО, сохранение централизации сердечного ритма по показателям ВСР. Сдвиги системной гемодинамики и

вегетативного тонуса под влиянием нагрузочного комплекса также представлены на рисунке 3. Таким образом, выделенные группы характеризовались разнонаправленными изменениями адапционных резервов испытуемых и могут свидетельствовать об адапционных изменениях организма при воздействии нагрузочного комплекса, где адаптивный ответ у значительной доли обучающихся свидетельствует о наличии у них достаточно высокого резерва адаптации. Однако у ряда студентов наблюдается выраженное утомление и перенапряжение организма.

После нагрузочного тестирования каждый студент получал отдых продолжительностью в десять минут, по завершении которого повторно оценивали функциональные резервы сердечно-сосудистой системы с использованием программно-аппаратного комплекса. Затем выполняли кластерный анализ для распределения студентов по группам в постнагрузочном периоде. Определено 3 кластера (табл. 5), что позволило выявить разнонаправленные изменения регуляторных механизмов организма в течение этого периода. Графическое представление кластерного анализа представлено на графике среднего для каждого кластера и диаграмме рассеяния (рис. 4).

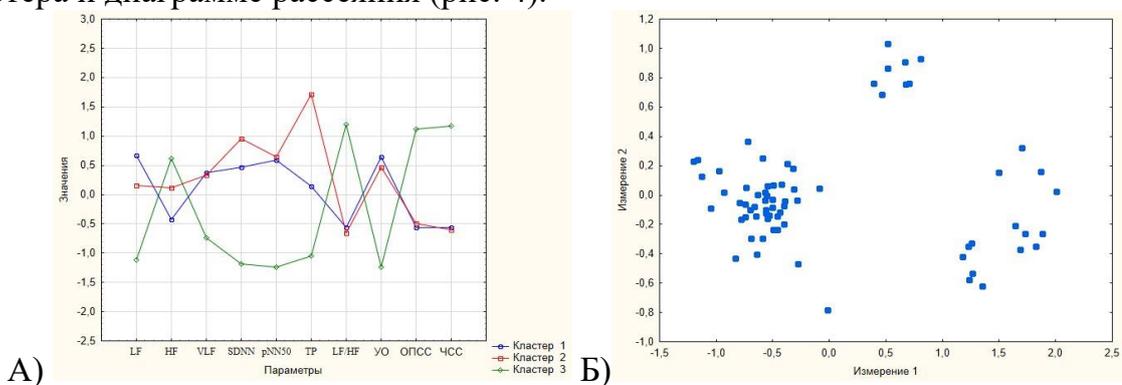


Рисунок 4 – График средних показателей гемодинамики и variability сердечного ритма в течение постнагрузочного периода (А) и диаграмма рассеяния (Б) кластерного анализа для них

Таблица 5 – Количество испытуемых и значения показателей гемодинамики и variability сердечного ритма в кластерах в течение постнагрузочного периода (n=70), M±m

Параметр	1 кластер (n=36)	2 кластер (n=11)	3 кластер (n=23)	P<0,05
LF (%)	0,67±0,62	0,15±0,73	-1,12±0,47	1-2; 2-3; 1-3
HF (%)	-0,43±0,37	0,11±0,78	0,62±1,4	1-2; 2-3; 1-3
VLF (%)	0,37±0,53	0,33±0,35	-0,74±1,33	2-3; 1-3
SDNN	0,46±0,48	0,96±0,66	-1,19±0,54	1-2; 2-3; 1-3
pNN50	0,59±0,4	0,65±0,46	-1,24±0,64	2-3; 1-3
TP	0,15±0,34	1,71±0,65	-1,05±0,34	1-2; 2-3; 1-3
LF/HF	-0,56±0,39	-0,66±0,98	1,19±0,49	2-3; 1-3
YO	0,65±0,41	0,47±0,65	-1,24±0,53	1-2; 2-3; 1-3
OPCC	-0,57±0,33	-0,49±0,25	1,12±0,1	1-2; 2-3; 1-3
ЧСС	-0,57±0,26	-0,6±0,29	1,18±0,91	2-3; 1-3

Примечание: P – значимость различий между группами 1, 2, 3.

Из таблицы видно, что средние значения показателей третьего кластера выделяются среди остальных групп. Соотнеся это с показателями, полученными до введения стандартизированных коэффициентов, мы предположили, что у представителей третьего кластера процессы восстановления в постнагрузочном

периоде затруднены, что проявилось в статистически значимом увеличении ЧСС, спазме сосудов по параметру ОПСС, преобладании централизации сердечного ритма по статистическим и спектральным показателям ВСР ($p < 0,05$ для всех параметров). Студенты второго кластера находятся на границе адаптации/дезадаптации.

3. Гемодинамическая дифференциация студентов по реактивности на стандартную физическую нагрузку.

Учитывая некоторые особенности гемодинамики и ВСР студентов в течение постнагрузочного периода, мы применили визуализацию полученных индикаторов. Для этого мы построили графики парных диаграмм параметров гемодинамики, характеризующих насосную функцию сердца и резистивность сосудов, а также показатели ВСР, отражающие статистические и спектральные составляющие ритма сердца среди студентов 1 и 2 курсов, а также среди 3 курса обучения. Вначале оценивались пары УО-ОПСС (рис. 5А, рис. 5Б).

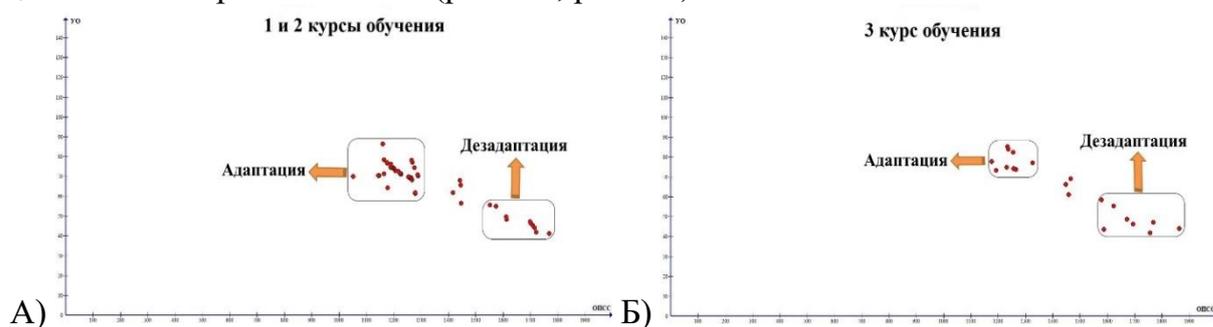


Рисунок 5 – Распределение испытуемых разных курсов по показателям ударного объема и общего периферического сосудистого сопротивления (А – 1 и 2 курсы, Б – 3 курс)

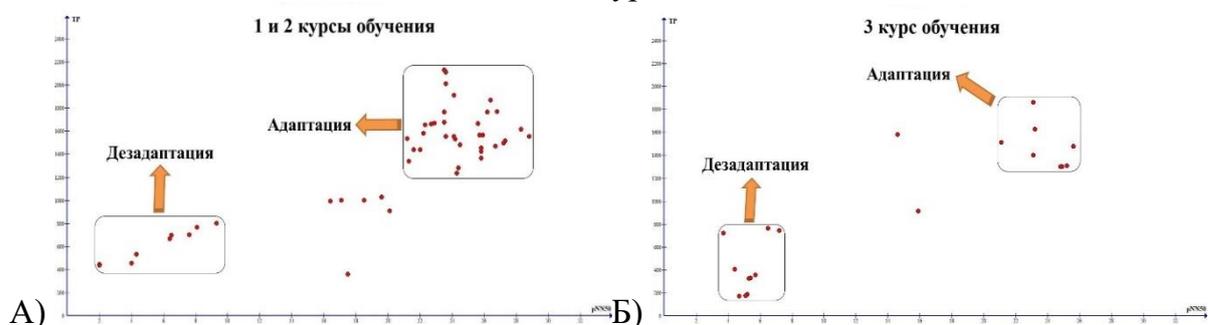


Рисунок 6 – Распределение испытуемых разных курсов по показателям рNN50 и общей мощности спектра (А – 1 и 2 курсы, Б – 3 курс)

Установлено, что ОПСС среди обучающихся 1-2 курсов, демонстрировавших статистически неразличимый уровень гемодинамических показателей и ВСР, наблюдался выше уровня физиологического диапазона у 10 студентов (14,3 %), а среди третькурсников – у 8 человек (11,4 %) на фоне незначительного изменения УО. У 36 испытуемых 1-2 курсов обучения (51,4 %) отмечено достаточно адаптивное значение ОПСС на фоне умеренного роста УО, что дает основания характеризовать данную тенденцию как фактор, обусловленный перестройкой кардиогемодинамики у более подготовленных лиц. Среди обучающихся третьего курса высокие адаптационные резервы наблюдались у 9 студентов (12,9 %).

Затем изучали пары «рNN50 – TP» (рис. 6А, рис. 6Б). Характер изменений в виде значительного снижения обоих показателей зафиксирован у 10 человек 1 и 2 курсов (14,3 %), а среди третькурсников – у 8 студентов (11,4 %). Это характеризует

угнетение автономного контура регуляции кардиоритма и снижение адаптационных резервов организма. У 34 испытуемых 1 и 2 курсов (48,6 %), а также у 8 обучающихся 3 курса (11,4 %) отмечено наличие удовлетворительной адаптации к физической нагрузке с нахождением вышеуказанных показателей в области нормативных значений, что характеризует наличие оптимального уровня адаптационных резервов и совокупное взаимодействие центрального и автономного контуров регуляции сердечного ритма. Характер этих изменений позволяет, на основании визуализации данных, дифференцировать тип гемодинамического ответа и состояние регуляторных систем и обосновывает возможность предположить эффективность применения данных параметров в качестве выявления их взаимосвязи, что позволяет обосновать проведение спортивного отбора среди разных групп студентов.

4. Корреляционно-регрессионный анализ функционально-метаболических параметров организма

Графическое представление корреляционного анализа осуществлялось с целью оценки взаимосвязей параметров системной гемодинамики, ВСР и окислительного метаболизма с функционально-метаболическим параметром (рис. 7).

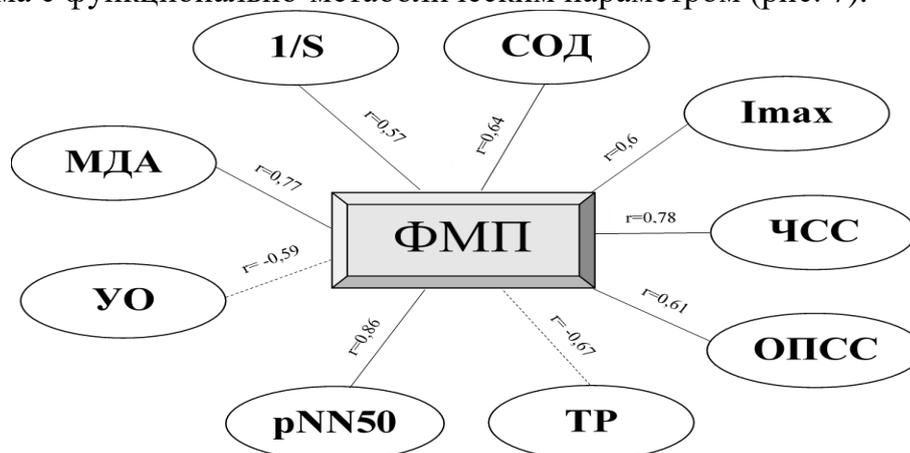


Рисунок 7 – Корреляционные взаимосвязи показателей системной гемодинамики, вариабельности сердечного ритма и окислительного метаболизма с функционально-метаболическим параметром

Для оценки достоверности сформированной формулы для расчета ФМП применялась модель линейной регрессии следующего вида:

$$\text{ФМП} = -3,194 + 0,955 * 1/S + 0,01 * \text{СОД} + 0,1 * \text{МДА} + 1,001 * \text{Иmax} + 0,021 * \text{ЧСС} - 0,01 * \text{УО} + 0,00006 * \text{ОПСС} + 0,0001 * \text{ТР} + 0,002 * \text{pNN50}$$

где 1/S; Иmax; УО; ТР; pNN50 – независимые переменные уравнения регрессии, -3,194 – свободный член уравнения регрессии, 0,955; 0,01; 0,1; 1,001; 0,021; 0,01; 0,00006; 0,0001; 0,002 – регрессионные коэффициенты

Использование в вышеуказанной формуле представленных показателей гемодинамики, вариабельности сердечного ритма и окислительного метаболизма обосновано с помощью расчета коэффициентов уравнения регрессии, их статистической значимости и доверительных интервалов (табл. 6). Зависимость полученной модели уравнения от исходного значения ФМП установлено на уровне 81,5% (по коэффициенту детерминации $R^2 = 0,8155$). Среднее значение модельной ошибки составило 3,5 %, а максимальное – 4,4 %, что подтверждает достаточную

валидность полученной модели. Становится возможным сделать вывод о целесообразности использования показателей 1/S, СОД, МДА, I_{max}, ЧСС, УО, ОПСС, ТР и рNN50 при калькуляции ФМП, как интегрального показателя адаптационных резервов.

Таблица 6 – Коэффициенты уравнения регрессии, их статистическая значимость и доверительные интервалы показателей, используемых в расчете ФМП

	β	Стандартная ошибка	P-значение	Нижний ДИ (95 %)	Верхний ДИ (95 %)
ФМП	-3,194	0,08	$1 \cdot 10^{-73}$	-3,34496	-3,04212
1/S	0,955	0,02	$6,5 \cdot 10^{-76}$	0,91206	0,99871
СОД	0,01	0,0003	$1,1 \cdot 10^{-49}$	0,00911	0,01067
МДА	0,1	0,003	$5 \cdot 10^{-179}$	0,98906	1,00136
I _{max}	1,001	0,005	$3 \cdot 10^{-153}$	0,99126	1,01149
ЧСС	0,021	0,0002	$2 \cdot 10^{-120}$	0,02034	0,02112
УО	-0,01	0,0001	$1 \cdot 10^{-111}$	-0,01023	-0,00978
ОПСС	0,00006	$1 \cdot 10^{-5}$	$8,4 \cdot 10^{-8}$	$3,8 \cdot 10^{-5}$	$7,9 \cdot 10^{-5}$
ТР	0,0001	$2,7 \cdot 10^{-5}$	0,03	$-4 \cdot 10^{-5}$	$6,5 \cdot 10^{-5}$
рNN50	0,002	0,0002	$9,9 \cdot 10^{-17}$	0,00171	0,00258

Примечание: P-значение – достоверность значений коэффициентов уравнения

5. Определение гемодинамических показателей студентов в состоянии покоя методом тонометрии и программно-аппаратным способом

Изучение системной гемодинамики тонометрическим способом продемонстрировало ее особенности у студентов разных курсов обучения (табл. 7). Показано, что студенты 3 курса имели тенденцию к снижению адаптационных резервов. Отмечены сниженные возможности сердца при выбросе крови (по параметру УО), усиление спазма сосудов студентов 3 курса (по параметру ОПСС), что оказывает влияние на уровень САД, также зафиксированного в более высоком диапазоне, а также пограничное состояние к напряжению адаптационных механизмов по параметру АП. Уровень ЧСС при этом может иметь компенсаторное значение. Это может свидетельствовать об увеличении напряжения регуляторных систем в состоянии покоя среди студентов 3 курса. У обучающихся 1 и 2 курсов показатели были в пределах норматива.

Идентичные различия в показателях между группами студентов получены и при исследовании программно-аппаратным способом (табл. 8), где исследуемые маркеры были аналогичны результатам тонометрии. Отмечался рост ЧСС, ОПСС, САД с одновременным уменьшением значений УО, а также более низким уровнем LVSW. Это может характеризовать снижение сократительной способности миокарда и компенсацию этого фактора повышенным уровнем АД, ЧСС, увеличением тонуса гладкомышечных волокон сосудистой стенки.

Следует отметить и изменение параметров ВСР студентов разных курсов обучения. У третьекурсников наблюдали напряжение регуляторных механизмов, что подтверждается характером изменений статистических и спектральных показателей ВСР. К примеру, уровень SDNN и рNN50 у них приближался к нижней границе физиологического норматива, что указывало на уменьшение вариации кардиоритма, усиление напряжения регуляторных систем и преобладание центрального контура управления.

Таблица 7 – Результаты гемодинамических показателей студентов 1-3 курсов в состоянии физиологического покоя, полученные с помощью проведения тонометрии и расчетов по общепринятым формулам (n=438), M±m

Параметр/ Курс обучения	Группа студентов			P<0,05
	Студенты 1 курса (n= 152)	Студенты 2 курса (n= 147)	Студенты 3 курса (n= 139)	
САД, мм.рт.ст.	124,1±7,7	125,9±7,9	132,9±8,4	1-3; 2-3
ДАД, мм.рт.ст.	75,7±6,9	76,3±5,8	76,5±5,8	
ЧСС, уд/мин	71,9±5,2	71,2±5,9	79,4±6,1	1-3; 2-3
УО, мл	74,0±6,1	78,9±6,3	65,9±6,2	1-3; 2-3
СВ, л/мин	5,3±0,6	5,6±0,6	5,2±0,7	
СрАД, мм.рт.ст.	91,8±2,4	92,8±2,3	95,3±3,1	1-3; 2-3
ОПСС, дин·с·см ⁻⁵	1385,3±91,8	1325,4±87,4	1465,7±76,9	1-3; 2-3
ППТ, м ²	1,9±0,1	1,9±0,1	2,0±0,1	
СИ, л/мин/м ²	2,8±0,5	3,0±0,4	2,6±0,3	
АП, усл. ед.	2,1±0,1	2,2±0,1	2,5±0,1	1-3; 2-3

Примечание: P – значимость различий между группами 1, 2, 3.

Таблица 8 – Результаты гемодинамических показателей студентов 1-3 курсов в состоянии покоя, полученные с помощью «системы спортивного тестирования «MedicalSoft» (n=438), M±m

Параметр/ Курс обучения	Группа студентов			P<0,05
	Студенты 1 курса (n= 152)	Студенты 2 курса (n= 147)	Студенты 3 курса (n= 139)	
САД, мм.рт.ст.	123,7±8,1	124,9±8,6	131,3±8,4	1-3; 2-3
ДАД, мм.рт.ст.	75,5±5,8	75,9±5,7	80,3±5,4	1-3; 2-3
ЧСС, уд/мин	70,2±5,4	71,9±5,8	80,4±5,6	1-3; 2-3
УО, мл	73,6±6,3	77,1±6,2	66,3±6,2	1-2; 1-3; 2-3
СВ, л/мин	5,2±0,8	5,5±0,7	5,3±0,8	
ОПСС, дин·с·см ⁻⁵	1385,3±88,5	1325,4±85,8	1465,8±80,8	1-3; 2-3
pNN50, %	22,1±1,6	24,9±2,9	16,8±2,8	1-2; 1-3; 2-3
SDNN, мс	47,9±1,9	51,3±1,9	42,6±1,7	1-2; 1-3; 2-3
СИ, л/мин/м ²	2,8±0,5	3,0±0,4	2,6±0,3	
LVSW, гм/удар/м ²	64,3±9,4	65,8±8,1	61,5±7,6	1-3; 2-3
LF/HF, усл.ед.	1,6±0,1	1,8±0,1	2,6±0,1	1-2; 1-3; 2-3
TP, мс ²	1675,7±61,8	1667,3±50,5	1661,3±73,4	1-2; 1-3; 2-3
VLF, мс ²	600,7±27,5	624,3±23,4	653,3±31,6	1-3; 2-3
LF, мс ²	553,7±13,2	559,8±15,6	607,7±15,5	1-3; 2-3
HF, мс ²	521,2±20,2	483,3±17,4	400,2±14,8	1-2; 1-3; 2-3
VLF,%	35,9±2,7	37,5±3,6	39,3±1,6	1-2; 1-3; 2-3
LF, %	33,1±3,1	33,6±2,9	36,6±1,9	1-3; 2-3
HF, %	31,1±1,8	28,9±2,8	24,1±2,7	1-2; 1-3; 2-3
SI, усл. ед.	89,4±9,2	102,6±9,7	154,7±12,3	1-2; 1-3; 2-3

Примечание: P – достоверность отличий между группами 1, 2, 3.

Аналогичный характер изменений выявился в ходе изучения спектральных параметров ВСР. У студентов 3 курса обнаружено снижение значений параметров TP и HF, с одновременным увеличением показателей LF, VLF, LF/HF, что указывало

на усиление активности симпатического отдела ВНС и доминирование центрального контура регуляции кардиоритма, что подтверждалось наблюдением за индикатором, характеризующим соотношение низкочастотного и высокочастотного компонентов спектрального анализа ВСР. Обращает на себя внимание и изменение SI, зафиксированного на уровне $154,7 \pm 9,4$ условных единиц у представителей 3 курса, что характеризуется как тенденция к наличию начальной стадии дистресса и снижение адаптивных резервов у этой группы обучающихся.

6. Изучение окислительного метаболизма и интерпретация функционально-метаболического параметра у студентов различных курсов обучения

При определении метаболического статуса сформированных групп наблюдалось статистически значимые различия исследуемых показателей преимущественно у студентов третьего курса (табл. 9).

Таблица 9 – Результаты исследования окислительного метаболизма у студентов 1-3 курсов в состоянии физиологического покоя ($n=438$), $M \pm m$

Параметр	Группа студентов			P<0,05
	Студенты 1 курса (n= 152)	Студенты 2 курса (n= 147)	Студенты 3 курса (n= 139)	
I _{max} , МВ	$1,08 \pm 0,3$	$1,21 \pm 0,4$	$1,42 \pm 0,3$	1-2; 1-3; 2-3
1/S	$0,064 \pm 0,002$	$0,058 \pm 0,003$	$0,057 \pm 0,003$	1-2; 1-3
МДА _{эр} , нмоль/мл	$6,13 \pm 0,8$	$6,39 \pm 0,7$	$6,59 \pm 0,9$	1-2; 1-3
МДА _{пл} , нмоль/мл	$1,4 \pm 0,1$	$1,4 \pm 0,2$	$1,6 \pm 0,1$	1-3; 2-3
СОД, ед. ак./г НВ	$138,6 \pm 3,1$	$130,9 \pm 3,4$	$115,4 \pm 3,2$	1-2; 1-3; 2-3
Каталаза, ед.ак./г НВ	$67,3 \pm 2,8$	$62,0 \pm 2,7$	$56,8 \pm 2,4$	1-2; 1-3; 2-3

Примечание: P – достоверность отличий между группами 1, 2, 3

Отмечалось усиление уровня скорости свободнорадикального окисления в биожидкости, что отражалось в увеличении I_{max} и снижении 1/S у обучающихся 3 курса. Кроме того, у них наблюдалось усиление активности ПОЛ по уровню концентрации МДА, а также относительное снижение активности АОС, что подтверждают изменения СОД и каталазы как основных ферментов, участвующих в ингибировании свободнорадикальных процессов.

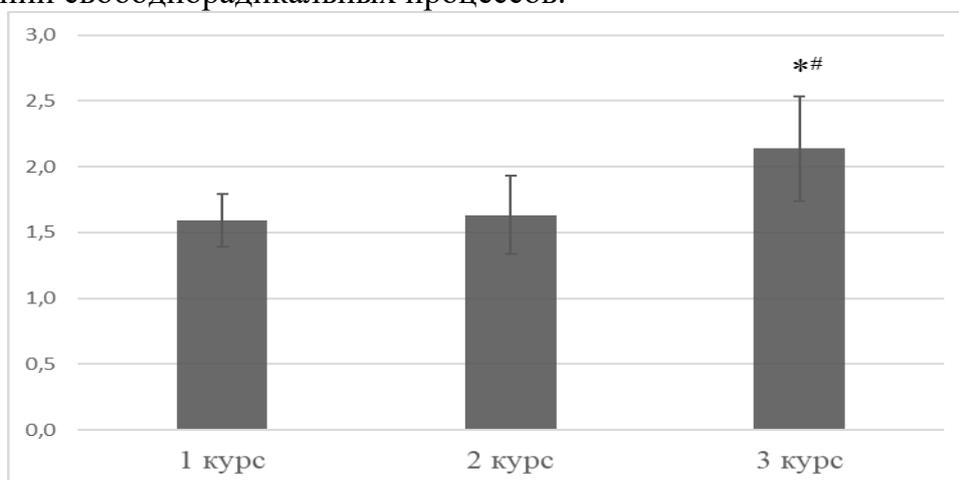


Рисунок 8 – Функционально-метаболический параметр у студентов 1-3 курсов в состоянии покоя (* - $p < 0,05$ по отношению к значениям студентов 1 курса; # - $p < 0,05$ по отношению к значениям студентов 2 курса)

Таким образом, тенденция к напряжению регуляторных систем у студентов 3 курса подтвердилась и при исследовании показателей окислительного метаболизма, которые характеризуют увеличение скорости образования свободных радикалов, увеличение процессов липопероксидации и снижение активности ферментов АОС.

Расчет функционально-метаболического параметра подтверждает сделанные ранее предположения об уровне адаптивных резервов у этой группы студентов (рис. 8). Он характеризует у них снижение функциональных резервов. На основании проведенных исследований мы предлагаем данный показатель как интегрально отражающий функционально-метаболический статус организма и его системный ответ на стандартную физическую нагрузку.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные свидетельствуют о различных особенностях состояния адаптационных резервов организма студентов 1-3 курсов обучения. Установлено, что по характеру срочной адаптации организма на стандартную физическую нагрузку ВФСК «ГТО» следует выделить бег на 100 метров и подтягивания из виса на перекладине, вызывающие существенные сдвиги в показателях системной гемодинамики, вариабельности сердечного ритма и окислительного метаболизма. Эти упражнения рекомендуются к использованию в качестве оптимальных для тестирования функционального состояния организма. Кроме того, кластерный анализ позволил выделить группы испытуемых, у которых используемые нагрузки вызывает разнонаправленное изменение изучаемых показателей, приводящие к умеренному или выраженному напряжению регуляторных систем, в зависимости от уровня адаптационных резервов организма. Определение кластеров в постнагрузочном периоде позволило установить особенности восстановительных процессов организма студентов, которые зависят от индивидуального функционального статуса. В ходе использования двумерного анализа показателей гемодинамики и вариабельности сердечного ритма показан дифференцированный тип реактивности гемодинамики и регуляторных систем на физическую нагрузку.

Показатели, характеризующие насосную функцию сердца и резистивность сосудов (УО и ОПСС), а также состояние регуляторных систем (pNN50 и TP) рекомендуются для использования в качестве наиболее информативных индикаторов адаптационного потенциала сердечно-сосудистой системы. Вместе с тем, разработан показатель, учитывающий состояние системной гемодинамики, ВСР и окислительного метаболизма, который позволяет осуществлять интегральную оценку функциональных резервов организма. С учетом его верификации с применением корреляционно-регрессионного анализа, он может рассматриваться как критерий варианта ответа на физическую нагрузку и комплексно оценить функционально-метаболические резервы. В ходе исследования студентов разных курсов обучения тонометрическим и аппаратным способами в состоянии физиологического покоя установлено, что среди представителей 3 курса наблюдается снижение адаптационных резервов. При анализе показателей системной гемодинамики наблюдается снижение насосной функции сердца, усиление спазма сосудов, увеличение САД и ЧСС, более высокий уровень АП, а также уменьшение вариации кардиоритма и усиление преобладания центрального контура регуляции, увеличение активности симпатического отдела ВНС, сдвиги SI к пограничному значению, характеризующие напряжение систем регуляции. Кроме того, у них зафиксировано усиление скорости свободнорадикального окисления (по показателям биохемилюминесценции) и снижение активности ферментов АОС

(СОД, каталаза). Расчет ФМП также подтверждает предположение о снижении функциональных резервов сердечно-сосудистой системы и окислительного метаболизма студентов 3 курса.

Таким образом, анализ адаптационных резервов в условиях различных состояний позволяют оценить состояние организма и контролировать динамику его функционального статуса.

ВЫВОДЫ

1. Выявлено, что характер гемодинамического ответа на стандартную физическую нагрузку зависит от ее вида и интенсивности. Наиболее существенную реакцию вызывают бег на 100 м и подтягивание на перекладине. После выполнения нагрузочного комплекса выделено 3 группы испытуемых, где в первой группе наблюдается умеренная симпатикотония и централизация сердечного ритма, физиологическое увеличение УО и ЧСС, а также снижение ОПСС, во второй – рост ЧСС, разнонаправленные колебания УО, сохранение центрального контура регуляции, а в третьей – выраженное преобладание симпатической регуляции, резкое увеличение активности центрального контура регуляции, снижение общей мощности спектра, выраженное увеличение ЧСС и вазоконстрикция сосудов по показателю ОПСС, значительное увеличение АД.

2. Кластерный анализ по параметрам гемодинамики и показателям вариабельности сердечного ритма позволяет выделить 3 группы студентов в постнагрузочном периоде, по реакции на физическую нагрузку и уровня их функциональных резервов. Студенты 1 кластера характеризуются высокими резервами адаптации организма, обучающиеся 2 кластера находятся в пограничном состоянии адаптации/дезадаптации по параметрам гемодинамики и вариабельности сердечного ритма, тогда как представители 3 кластера имеют нарушение восстановительных процессов, что свидетельствует о наличии у них сниженных адаптационных резервов.

3. Применение двумерного анализа (по парам показателей системной гемодинамики и вариабельности кардиоритма) позволяет выделить типы гемодинамического ответа на стандартную физическую нагрузку (адаптивный или дезадаптивный). Наиболее информативными являются пары «ударный объем – общее периферическое сопротивление сосудов» и «параметр $pNN50$ – общая мощность спектра». Эти комбинации рекомендуются для функционального тестирования адаптационного потенциала сердечно-сосудистой системы.

4. Метаболический ответ на физические нагрузки высокой интенсивности (бег на дистанцию 100 м и подтягивания из виса на перекладине) увеличивает интенсификацию свободнорадикальных процессов, снижение общей антиоксидантной активности плазмы крови и умеренное ингибирование каталитических свойств каталазы и супероксиддисмутазы.

5. Функционально-метаболический показатель, рассчитанный на основе корреляционно-регрессионного анализа, интегрируя наиболее информативные показатели гемодинамики (частота сердечных сокращений, ударный объем, общее периферическое сопротивление, общая мощность спектра и показатель $pNN50$) и баланса про- и антиоксидантных систем (интенсивность свободнорадикальных процессов, общая антиоксидантная активность, активность супероксиддисмутазы и концентрация малонового диальдегида в плазме крови), позволяет оценить характер ответа на стандартную физическую нагрузку.

6. Установлено, что студенты 3 курса, относительно испытуемых 1 и 2 курсов, имеют сниженные адаптационные резервы сердечно-сосудистой системы (по

уровню артериального давления, параметрам, характеризующим насосную функцию сердца, а также вариабельности кардиоритма), окислительного метаболизма (по параметрам Fe-индуцированной биохемиллюминесценции и активности антиоксидантных ферментов), и изменению интегрального функционально-метаболического параметра.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Bocharin I.** Cluster analysis of adaptation reserves of the body in the post-load period / **I. Bocharin**, E. Romanova, M. Kolokoltsev, A. Vorozheikin, T. Kispayev, D. Prikhodov, A. Konovalov, S. Aganov, T. Petrova-Gotova // Journal of physical education and sport. – 2023. – Vol 23, № 1. – P. 122–127. (доля автора 3 с.)
2. Martusevich A. Metabolic monitoring to assess the response of the body to physical loads / A. Martusevich, **I. Bocharin**, M. Guryanov, E. Romanova, M. Kolokoltsev, Y. Vyazovichenko, R. Lobastova, S. Smirnov, N. Balashkevich, E. Redi // Journal of physical education and sport. – 2023. – Vol. 23, № 6. – P. 1401–1406. (доля автора 2 с.)
3. **Bocharin I.** Young men's body hemodynamics variability in different states of motor activity / **I. Bocharin**, A. Martusevich, M. Guryanov, S. Apoyan, M. Kolokoltsev, A. Melnichuk, A. Vorozheikin, E. Romanova // Journal of physical education and sport. – 2022. – Vol. 22, № 3. – P. 562–569. (доля автора 3 с.)
4. **Bocharin I.** Comparative analysis of methods for determining some hemodynamic parameters for students / **I. Bocharin**, M. Guryanov, I. Mukhina, O. Limarenko, M. Kolokoltsev, T. Vrachinskaya, E. Romanova, S. Aganov, A. Martusevich // Journal of physical education and sport. – 2022. – Vol. 22, №11. – P. 2663–2668. (доля автора 3 с.)
5. Martusevich A.K. Adaptive potential of the cardiovascular system of medical students on the basis of load testing / A.K. Martusevich, **I.V. Bocharin**, M.S. Guryanov, A.O. Kashirina // Teoriya i Praktika Fizicheskoy Kultury. – 2022. – № 9. – P. 63–65. (доля автора 1,5 с.)
6. Martusevich A. Comprehensive assessment of structural and metabolic peculiarities of blood plasma in highly qualified athletes / A. Martusevich, **I. Bocharin**, K. Karuzin, M. Guryanov, O. Uspenskaya, M. Kolokoltsev, Y. Vyazovichenko, E. Romanova // Journal of Physical Education and Sport. – 2022. – Vol. 22, № 1. – P. 160–166. (доля автора 2,5 с.)
7. Martusevich A.K. Monitoring the effectiveness of personalized metabolic correction in athletes using biocrystallomics techniques / A.K. Martusevich, K.A. Karuzin, **I.V. Bocharin**, A.V. Surovegina // International journal of biology and biomedical engineering. – 2022. – Vol 16. – P. 175–178. (доля автора 1 с.)
8. **Bocharin I.** Cardiac diagnostics of student-athletes by the HRV method / **I. Bocharin**, M. Guryanov, M. Kolokoltsev, A. Vorozheikin, A. Gryaznykh, E. Romanova, Y. Kiseliv // Journal of Physical Education and Sport. – 2021. – Vol. 21, № 6. – P. 3496–3503. (доля автора 3 с.)
9. Martusevich A.K. The study of adaptation reserves of the heart in medical students during education / A.K. Martusevich, **I.V. Bocharin**, L.R. Dilenyanyan, Y.V. Kiseliv // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. – 2021. – Vol. 13, № 1. – P. 208–221. (доля автора 6 с.)
10. Martusevich A.K. The Peculiarities of Heart Rate Variability in Student Athletes / A.K. Martusevich, **I.V. Bocharin**, N.A. Ronzhina, S.A. Apoyan, L.R. Dilenyanyan, M.S. Guryanov // International journal of biomedicine. – 2021. – Vol. 11, № 2. – P. 169–172. (доля автора 2 с.)
11. **Bocharin I.** Hemodynamics state in students of megapolis universities: Single-center cohort study / **I. Bocharin**, A. Martusevich, M. Guryanov, S. Apoyan, Y. Kiseliv, L. Dilenyanyan // Archiv Euromedica. – 2020. – Vol. 10, № 4. – P. 39-40. (доля автора 1 с.)

12. **Бочарин И.В.** Оценка состояния гемодинамики студентов в зависимости от уровня их спортивной подготовки / **И.В. Бочарин**, А.К. Мартусевич, М.С. Гурьянов, М.В. Засыпкин, М.А. Широкова, А.А. Щуров // Международный научно-исследовательский журнал. – 2020. – № 6 (96). – С. 16–19. (доля автора 2 с.)

13. Dilenyau L.R. Typological structure of hemodynamics in age scale / L.R. Dilenyau, А.К. Martusevich, G.S. Belkaniya, **I.V. Bocharin** // Archiv euromedica. – 2019. – Vol. 9. – No. 2. – P. 65–67. (доля автора 1 с.)

Публикации в других изданиях, статьи и тезисы докладов в материалах конференций:

1. **Бочарин И.В.** Гемодинамический ответ на дозированную физическую нагрузку / **И.В. Бочарин**, Д.С. Зайцев // Motor control, сборник тезисов IX Российской, с международным участием, конференции по управлению движением, посвященной 95-летию со дня рождения И.Б. Козловской. – Казань: Издательство «Общество с ограниченной ответственностью «Издательско-полиграфическая компания «Бриг», 2 – 4 июня 2022 г. – С. 111–112. (доля автора 1,5 с.)

2. **Бочарин И.В.** Мониторинг адаптационных резервов студентов методом кардиоинтервалографии / **И.В. Бочарин**, А.К. Мартусевич, К.В. Нестеров // Материалы IX Международной научно-практической конференции «Безопасный спорт – 2022». – Санкт-Петербург: Издательство «ФГБОУ ВО СЗГМУ им. И.И. Мечникова Минздрава России», 12 – 13 мая 2022 г. – С. 94–101. (доля автора 4 с.)

3. **Бочарин И.В.** Гемодинамическая характеристика сердечно-сосудистой системы обучающихся в зависимости от курса обучения / **И.В. Бочарин**, В.А. Тумаев // Материалы XXVIII Всероссийской конференции молодых ученых с международным участием «Актуальные проблемы биомедицины». – Санкт-Петербург: Издательство «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. академика И.П. Павлова», 24 – 26 марта 2022 г. – С. 174–175. (доля автора 1,5 с.)

4. **Бочарин И.В.** Оценка адаптационного потенциала сердечно-сосудистой системы студентов на разных этапах обучения / **И.В. Бочарин** // Адаптивная физическая культура. – 2022. – Т. 90. – № 2. – С. 23–24. (доля автора 2 с.)

5. **Бочарин И.В.** Особенности состояния гемодинамики студентов в зависимости от наличия спортивной подготовки / **И.В. Бочарин**, А.К. Мартусевич, М.С. Гурьянов, Д.Д. Чечурова // Здоровье человека, теория и методика физической культуры и спорта. – 2021. – Т. 22. – № 2. – С. 62–71. (доля автора 4 с.)

6. **Бочарин И.В.** Оценка функционального состояния организма студентов в зависимости от профиля обучения / **И.В. Бочарин**, А.К. Мартусевич, А.В. Павлычев // Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Актуальные вопросы научно-методического обеспечения системы подготовки спортивного резерва в Российской Федерации». – Казань: Издательство «Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжская государственная академия физической культуры, спорта и туризма», 19 – 20 ноября 2020 г. – С. 8–13. (доля автора 3 с.)

7. **Бочарин И.В.** Комплексный скрининг особенностей вариабельности сердечного ритма студентов в условиях мегаполиса / **И.В. Бочарин**, А.К. Мартусевич, Л.Р. Диленян // Материалы XIV Международной научной конференции «Системный анализ в медицине». – Благовещенск: Издательство «Дальневосточный научный центр физиологии и патологии дыхания», 15 – 16 октября 2020 г. – С. 128–131. (доля автора 2 с.)

Список сокращений

ВНС – вегетативная нервная система
ССС – сердечно-сосудистая система
ВСР – вариабельность сердечного ритма
САД – систолическое артериальное давление
ДАД – диастолическое артериальное давление
ПД – пульсовое давление
АП – адаптационный потенциал
ЧСС – частота сердечных сокращений
УО – ударный объем
СВ – сердечный выброс
ОПСС – общее периферическое сосудистое сопротивление
pNN50 - соотношение NN-интервалов, которые отличаются на 50 мсек и более
SDNN – стандартное отклонение средних интервалов NN
СИ – сердечный индекс
LVSW – ударная работа левого желудочка
LF/HF - отношение значений низкочастотного и высокочастотного компонентов вариабельности сердечного ритма
TP – общая мощность спектра
LF – мощность спектра кардиоритма в области низких частот
HF – мощность спектра кардиоритма в области высоких частот
VLF – мощность спектра кардиоритма в области очень низких частот
SI – степень напряжения регуляторных систем, индекс стресса
ВФСК ГТО – Всероссийский физкультурно-спортивный комплекс «Готов к труду и обороне»
АОС – антиоксидантная система
АФК – активные формы кислорода
ПОЛ – перекисное окисление липидов
СОД – супероксиддисмутаза
МДА – малоновый диальдегид
БХЛ - биохемилюминесценция
1/S – обратный показатель светосуммы хемилюминесценции
I_{max} – максимальная интенсивность свечения хемилюминесценции
ФМП – функционально-метаболический параметр

Бочарин Иван Владимирович

ФУНКЦИОНАЛЬНО-МЕТАБОЛИЧЕСКИЙ ОТВЕТ НА СТАНДАРТНУЮ
ФИЗИЧЕСКУЮ НАГРУЗКУ В ОЦЕНКЕ АДАПТИВНЫХ РЕАКЦИЙ ОРГАНИЗМА

Специальность 1.5.5 – Физиология человека и животных

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Подписано к печати 27.03.2024. Формат 60x84 1/16.
Усл. печ. л. 1,6. Тираж 100 экз. Заказ 113.

Издательство Приволжского исследовательского медицинского университета
603005, Н. Новгород, пл. Минина, 10/1
Тел.: (831) 465-42-23, 465-47-02
www.kupi-medbook.ru

Полиграфический участок ПИМУ
603104, Н. Новгород, ул. Медицинская, 5.