

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук»
Институт физиологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук

На правах рукописи



Бушманова Екатерина Андреевна

ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ И ЭНЕРГОТРАТЫ В ПОКОЕ И ПРИ ФИЗИЧЕСКОЙ
НАГРУЗКЕ РАЗНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ У
ВЫСОКОКВАЛИФИЦИРОВАННЫХ ЛЫЖНИКОВ-ГОНЩИКОВ

1.5.5. – Физиология человека и животных
Диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук

Научный руководитель –
кандидат биологических наук
Людина Александра Юрьевна

Сыктывкар 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ. СТРУКТУРА ЭНЕРГОТРАТ И ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ В УСЛОВИЯХ СПОРТИВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ.....	14
1.1 Механизмы энергетической адаптации человека к природным факторам Севера	14
1.2 Оценка энерготрат и энергопотребления у спортсменов.....	21
1.2.1 Структура суточных энерготрат	22
1.2.2 Энергопотребление	29
1.2.3 Годичный цикл и суточные энерготраты	35
1.3 Энергетический баланс, низкая доступность энергии и относительный дефицит энергии в спорте	38
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ	53
2.1 Объекты исследования	53
2.2 Организация исследования	53
2.3 Методы исследования.....	56
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	61
3.1 Пищевой термогенез и энерготраты покоя.....	61
3.2 Компонентный состава тела, энерготраты покоя и величина основного обмена у экспериментальной и контрольной групп	63
3.3 Энергетический баланс у экспериментальной группы в разные периоды годового цикла	66
3.4 Энерготраты в покое и при субмаксимальной физической нагрузке у экспериментальной группы.....	69
ГЛАВА 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	74
4.1 Пищевой термогенез и энерготраты покоя.....	74
4.2 Компонентный состава тела, энерготраты покоя и величина основного обмена у экспериментальной и контрольной групп	76
4.3 Энергетический баланс у экспериментальной группы в разные периоды годового цикла	82

4.4 Энерготраты в покое и при субмаксимальной физической нагрузке у экспериментальной группы.....	88
ВЫВОДЫ	93
ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ.....	94
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	95
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	97

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. Важнейшим фактором в повышении физической работоспособности и выносливости высококвалифицированных спортсменов является рациональное питание (Magkos, Yannakoulia, 2003; Vitale, Getzin, 2019; Kerksick et al., 2019; Jagim et al., 2021; Malsagova et al., 2021). Правильная организация питания должна включать в себя не только подсчет энергетической ценности рационов и количества макро- и микронутриентов, но и учитывать их качественный состав (Schwellnus, 2011; Lyudinina et al., 2020). Не менее значимым в построении эффективного тренировочного процесса и прогнозе результативности высококвалифицированных спортсменов является учет расхода энергии (Kerksick et al., 2019; Jagim et al., 2021), поскольку каждый компонент суточных энергозатрат тесно связан с особенностями питания, интенсивностью и длительностью физической нагрузки (Heydenreich et al., 2017; Wasserfurth et al., 2020).

У спортсменов циклических видов спорта было показано (Rodriguez et al., 2009; Capling et al., 2017; Heydenreich et al., 2017) незначительное снижение энергетической ценности рационов питания относительно международных норм (Kerksick et al., 2019; Jagim et al., 2021) в определенные периоды годового цикла. При этом, в большинстве случаев, фактическое питание спортсменов характеризовалось избыточным потреблением жиров и недостаточным потреблением углеводов (Heydenreich et al., 2017; Malsagova et al., 2021; Nieman, 2021, Денисова и др., 2022). Аналогичные изменения энергопотребления (ЭП) отмечаются у большинства лыжников-гонщиков, членов сборных команд зарубежных стран (Paradopolou et al., 2012; Carr et al., 2018; Grzebisz, 2020; Burke et al., 2021; Heikura et al., 2021; Kettunen et al., 2023), а также Республики Коми и России (Физиолого-биохимические..., 2019; Людинина и др., 2020).

Возникновение незначительных отклонений от адекватного питания и несоответствие ЭП суточным энергозатратам в долгосрочной перспективе могут

привести к нежелательным изменениям компонентного состава тела, таким как снижение безжировой (БМТ) и скелетно-мышечной масс (СММ) или увеличение процента жировой массы тела (%ЖМТ) (Thomas et al., 2016). Неконтролируемые сдвиги в компонентном составе тела, в свою очередь, могут вызвать снижение физической работоспособности, привести к переутомлению и различного рода заболеваниям, включая повышенный риск возникновения травм или развитие сердечно-сосудистых заболеваний (Ткачев и др., 1992; Бойко, 2005; Thomas et al., 2016; Melin et al., 2019; Grzebisz, 2020).

Исследования в области спорта высших достижений сосредоточена на взаимосвязи энерготрат с компонентным составом тела (Heydenreich et al., 2017; Purcell et al., 2020), мониторинг которого на основе биоимпедансного анализа (БИА) имеет важное значение для оценки функционального состояния спортсменов, позволяет раскрыть механизмы адаптации к физическим нагрузкам и оценить степень готовности спортсменов к соревнованиям (Santos et al., 2014; Polat et al., 2018; Солонин и др., 2020; Campa et al., 2021). На основании изменений показателей жировой (ЖМТ), БМТ, СММ, уровня гидратации и активной клеточной массы (АКМ) в организме спортсменов можно оптимизировать рацион питания для повышения эффективности тренировочного процесса (Polat et al., 2018; Campa et al., 2021). Несмотря на активное использование метода БИА в спортивной практике, в доступных источниках литературы (Larsson, Henriksson-Larsén, 2008; Grzebisz, 2020) содержатся незначительные сведения по оценке компонентного состава тела у высококвалифицированных лыжников-гонщиков. При этом, исследования, включающие комбинированный анализ ЭП и суточных энерготрат высококвалифицированных лыжников-гонщиков в течение годового цикла, единичны (Papadopoulou et al., 2012).

Отсутствие согласованного ЭП, соизмеримого с суточным расходом энергии, является причиной отрицательного энергетического баланса (ЭБ) (O'Connor, Slater, 2011; Burke et al., 2018; Siedler et al., 2023), а в сочетании с длительными интенсивными физическими нагрузками может привести к развитию низкой доступности энергии (НДЭ) (Loucks et al., 2011; Burke et al., 2018; Mountjoy et al.,

2018; Areta et al., 2021). Данное состояние ассоциируется с целым рядом эндокринных, сердечно-сосудистых, воспалительных, желудочно-кишечных и психических особенностей, которые были объединены под термином «Относительный дефицит энергии в спорте» (Relative Energy Deficiency in Sport, RED-S) (Mountjoy et al., 2018).

Исследования НДЭ и RED-S были сосредоточены в основном на женщинах, однако спортсмены-мужчины также могут быть подвержены воздействию НДЭ (Logue et al., 2020). Для них прослеживаются последствия, которые включают нарушения пищевого поведения, снижение концентрации половых гормонов и низкую минеральную плотность костной ткани, сходные с так называемой «триадой» у спортсменок. (Tenforde et al., 2016; De Souza et al., 2019). При этом, независимо от пола риски НДЭ и RED-S наиболее высоки для тех спортсменов, которые участвуют в соревнованиях на выносливость (Burke et al., 2018; Logue, 2018). Существует всего несколько исследований (Sjodin et al., 1994; Boulay et al., 1994) ЭБ у лыжников-гонщиков в подготовительный период годового цикла. Однако нет данных о вкладе макронутриентов в ЭП, энерготраты покоя (ЭТП) и энерготраты при физической нагрузке, также, как и отсутствуют исследования доступности энергии и RED-S у высококвалифицированных лыжников-гонщиков.

Учитывая, что спортсмены и тренеры недостаточно осведомлены о понятии RED-S и потенциальных негативных последствиях отрицательного ЭБ и НДЭ для здоровья и физической работоспособности (Brunet et al., 2019), вышеизложенное актуализирует важность изучения проблемы несбалансированного питания, сочетанного со структурой энерготрат, и последующего развития энергодефицита у высококвалифицированных спортсменов.

Степень разработанности темы исследования. В результате проведенного анализа доступной отечественной и зарубежной литературы установлено (Рылова, 2014; Santos et al., 2014; Barbieri et al., 2017; Campa et al., 2021; Захарова и др., 2022; Lai et al., 2022), что компонентный состав тела спортсменов хорошо изучен. Однако, среди имеющейся информации по обследованию спортсменов циклических видов спорта (Heydenreich et al., 2017; Сукач, Будько, 2018; Гудимов

и др., 2021), сведения по оценке компонентного состава тела у высококвалифицированных лыжников-гонщиков малочисленны (Larsson, Henriksson-Larsén, 2008; Grzebisz, 2020).

У большинства лыжников-гонщиков наблюдаются нарушения фактического питания, о чем свидетельствуют проведенные исследования (Физиолого-биохимические..., 2019), в том числе собственные (Людицина и др., 2020) и опыт зарубежных коллег (Papadopoulou et al., 2012; Carr et al., 2018; Grzebisz, 2020; Burke et al., 2021; Heikura et al., 2021; Kettunen et al., 2023).

У спортсменов ЭТП и суточные энерготраты достаточно хорошо изучены (Boulay et al., 1994; Silva et al., 2017; Jagim et al., 2018; MacKenzie-Shalders et al., 2020). Однако, большая часть подобных исследований посвящена анализу взаимосвязи энерготрат с компонентным составом тела (Heydenreich et al., 2017; Purcell et al., 2020). Существует также несколько исследований ЭБ у лыжников-гонщиков в подготовительный период годичного цикла (Sjodin et al., 1994; Boulay et al., 1994). При этом, исследования, включающие сочетанный анализ ЭП и суточных энерготрат у лыжников-гонщиков в течение годичного цикла, единичны (Papadopoulou et al., 2012). У высококвалифицированных лыжников-гонщиков отсутствует информация об исследовании структуры энерготрат, вклада энергетических субстратов в ЭТП и энерготраты при физической нагрузке разной интенсивности, кроме того, отсутствуют данные о доступности энергии.

Цель исследования. Изучить структуру энерготрат в покое и при физической нагрузке максимальной и субмаксимальной интенсивности во взаимосвязи с энергопотреблением у лыжников-гонщиков.

Задачи исследования:

1) Выявить различия в параметрах компонентного состава тела между высококвалифицированными лыжниками-гонщиками и молодыми людьми, не занимающимися спортом и их связь с энерготратами покоя.

2) Сопоставить расчетные значения основного обмена с величиной энерготрат покоя, измеренной методом непрямой калориметрии, у

высококвалифицированных лыжников-гонщиков и молодых людей, не занимающихся спортом.

3) Оценить энергопотребление у высококвалифицированных лыжников-гонщиков в подготовительный и соревновательный периоды годового цикла методом 24-часового воспроизведения рациона питания.

4) Исследовать вклад жиров и углеводов в структуру энергозатрат в покое и при физической нагрузке субмаксимальной и максимальной мощностях у лыжников-гонщиков.

5) Рассчитать показатель доступности энергии и выявить соответствие энергопотребления суточным энергозатратам у высококвалифицированных лыжников-гонщиков в подготовительный и соревновательный периоды годового цикла.

Научная новизна исследования. Получены новые данные, углубляющие понимание роли комплекса параметров компонентного состава тела (безжировая масса, скелетно-мышечная масса и активная клеточная масса) в регуляции энергозатрат покоя у высококвалифицированных лыжников-гонщиков в подготовительный период годового цикла.

Впервые проведена комплексная оценка фактического питания и суточных энергозатрат у высококвалифицированных лыжников-гонщиков в подготовительный и соревновательный периоды годового цикла с анализом вклада углеводов и жиров в структуру энергопотребления и энергозатрат.

Впервые показано, что маркером высокой физической работоспособности в зимних циклических видах спорта является соотношение жиров и углеводов, приближенное к 1:1, в структуре энергозатрат покоя и при физической нагрузке субмаксимальной интенсивности у спортсменов.

Получены новые данные о том, что сниженный уровень потребления углеводов в рационе питания и возрастание их вклада в энергообеспечение субмаксимальной и максимальной физической нагрузки лимитирует физическую работоспособность в анаэробной зоне у лыжников-гонщиков.

Впервые проведена оценка относительных энергодефицитов у высококвалифицированных лыжников-гонщиков в годичном цикле (подготовительный и соревновательный периоды) и выявлена низкая доступность энергии, ассоциированная со сниженной энергетической ценностью рационов и недостаточным потреблением углеводного компонента питания в подготовительный период.

Теоретическая и практическая значимость. Полученные результаты углубляют представления о структуре суточных энергозатрат, их связи с компонентным составом тела и энергопотреблением у высококвалифицированных лыжников-гонщиков, что может быть использовано для оптимизации рациона питания в тренировочном процессе спортсменов циклических видов спорта.

Разработан новый способ оценки энергозатрат и вклада макронутриентов в физическую работоспособность в тесте «до отказа» на системе «Охусон Про» (Свидетельство ГР программы для ЭВМ № 2022614375 от 21.03.2022).

Легитимность исследования. Настоящее исследование выполнено в Отделе экологической и медицинской физиологии Института физиологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ИФ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН) в период обучения в аспирантуре (2020-2024 гг.) и являлось разделом двух плановых тем НИР «Физическая работоспособность и способы её повышения у человека в условиях Севера, физиолого-биохимические эффекты действия веществ-регуляторов на метаболизм» (№ АААА-А17-117012310157-7, 2019-2021 гг.) и «Физиолого-биохимические механизмы устойчивости организма человека и животных к факторам Севера и физическим нагрузкам, способы её повышения и прогностической оценки» (№ ГР 021051201877-3 (FUUU-2022-0063), 2022-2026 гг.). Дизайн обследования одобрен независимым локальным комитетом по биоэтике ИФ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (протокол от 28.12.2022).

Методология и методы исследования. Для написания обзора литературы были использованы общенаучные методы исследования (анализ, синтез, аналогия, формализация, обобщение и др.). Экспериментальная работа выполнена с применением современных методов исследования энергопотребления, энерготрат и энергодефицитов в условиях спортивной деятельности, а также с использованием статистического анализа.

Положения, выносимые на защиту:

1) Соотношение жиров и углеводов, приближенное к 1:1, в структуре энерготрат покоя и при субмаксимальной физической нагрузке у высококвалифицированных лыжников-гонщиков является информативным маркером физической работоспособности. Увеличение вклада углеводов в энергообеспечение субмаксимальной физической нагрузки по сравнению с их фоновым уровнем лимитирует физическую работоспособность спортсменов в анаэробной зоне.

2) В дни интенсивных физических нагрузок подготовительного периода у 85% спортсменов выявлено нарушение энергетического баланса на фоне низкой доступности энергии, которая ассоциирована со сниженной энергетической ценностью рационов питания и недостаточным потреблением углеводного компонента в отличие от соревновательного периода годичного цикла.

3) Уравнение Харриса-Бенедикта обеспечивает более точную прогностическую оценку основного обмена по сравнению с формулой Кетч-МакАрдила, при этом занижение энерготрат покоя составляет 13% у высококвалифицированных лыжников-гонщиков и 4% у молодых людей, не занимающихся спортом.

Степень достоверности и апробация работы. Подтверждением является значительный объем обработанного материала с применением адекватных методов статистического анализа данных, публикацией результатов работы в рецензируемых научных изданиях и представлением на конференциях различного уровня: Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы и поиск инновационных подходов в спортивной медицине и реабилитации:

материалы» (г. Ташкент, 2021); VIII Всероссийская конференция с международным участием «Медико-физиологические проблемы экологии человека» (г. Ульяновск, 2021); IV Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Медико-физиологические основы спортивной деятельности на Севере» (г. Сыктывкар, 2021); Юбилейная международная научно-практическая конференции «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России: 75 лет на страже здоровья людей» (г. Москва, 2021); Научно-практическая конференция памяти олимпийского чемпиона Н.В. Пузанова «Актуальные вопросы в педагогических, медико-биологических и психологических аспектах физической культуры и спорта» (г. Санкт-Петербург, 2022); VI Всероссийская научно-практическая конференция тренеров по лыжным гонкам «Актуальные вопросы подготовки лыжников-гонщиков высокой квалификации (г. Сочи, 2022); XVII Международная научная конференция по вопросам состояния и перспективам развития медицины в спорте высших достижений «СпортМед-2022» (г. Москва, 2022); IV Всероссийская (XIX) молодежная научная школа-конференция «Молодежь и наука на Севере (г. Сыктывкар, 2022); IX Всероссийская конференция с международным участием, посвященная 35-летию Ульяновского государственного университета (г. Ульяновск, 2023); Академический форум молодых ученых стран Большой Евразии «Континент науки-2023» (г. Москва, 2023); V Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Медико-физиологические основы спортивной деятельности на Севере» (г. Сыктывкар, 2024); XII Всероссийская научно-практическая конференция «Современная система спортивной подготовки в биатлоне» (г. Омск, 2024); XI Международный конгресс «Безопасный спорт-2024» (г. Санкт-Петербург, 2024); II Международная научно-практическая конференция, посвященная 10-летию науки и технологии в РФ «Гигиенические аспекты восстановления в физкультурно-спортивной деятельности» (г. Челябинск, 2024).

Внедрение. Комплексное обследование спортсменов – членов сборных команд Республики Коми по лыжным гонкам Государственного автономного учреждения Республики Коми «Центра спортивной подготовки сборных команд»

Министерства физической культуры и спорта Республики Коми, которое включает тестирование «до отказа» на эргоспирометрической системе Oxycon Pro (Германия) на базе Института физиологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по блокам антропометрии, компонентного состав тела, анализа энергозатрат, оценки фактического питания в составе комплексно научной группы используется для определения функционального состояния спортсменов в процессе годового цикла и оптимизации тренировочного процесса (акт внедрения от 27.06.2022 г.). Методы исследования, используемые в работе, внедрены в программу обучения учащихся 9-10 классов общеобразовательных организаций Республики Коми в рамках Федерального проекта «Успех каждого ребенка» национального проекта «Образование» в Республике Коми на базе Регионального центра выявления и поддержки одаренных детей в области искусства, спорта и науки в Республике Коми «Академия юных талантов», являющегося структурным подразделением ГПОУ «Гимназия искусств при Главе Республики Коми» имени Ю.А. Спиридонова и созданного по модели Образовательного центра «Сириус» (акт внедрения от 29.06.2022 г) и студентов 3 курса отделения 49.02.01 Физическая культура ГПОУ «Сыктывкарского гуманитарно-педагогического колледжа им. И.А. Куратова» (акт внедрения от 23.05.2022 г.).

Структура и объем диссертации. Диссертация представлена: введением, четырьмя главами (обзор литературы, материалы и методы, результаты исследования и их обсуждение), выводами, практическими рекомендациями, списком сокращений и списком использованных источников. Библиографический список включает 252 источника, из них 197 зарубежных. Работа изложена на 125 страницах машинописного текста и содержит в себе 12 рисунков и 16 таблиц.

Личное участие автора в получении результатов. Автором были определены цель и задачи исследования, освоены методы. Проведено исследование, составлены базы данных, выполнен статистический анализ данных. При непосредственном участии автора были написаны тексты научных публикаций. Автором написаны диссертация и автореферат.

По материалам диссертации опубликовано 22 научные работы, из них семь статей включены в перечень ВАК и/или наукометрические базы WOS, Scopus, PubMed, RSCI и получено одно авторское свидетельство.

Соответствие паспорту научной специальности. Диссертация соответствует следующим областям паспорта специальности 1.5.5. – Физиология человека и животных: п.1. «Закономерности и механизмы поддержания постоянства внутренней среды организма», п.12. «Разработка новых методов исследований функций ... человека», п.14. «Физиологические основы здоровья, здорового образа жизни ...».

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю кандидату биологических наук Александре Юрьевне Людиной за помощь при выполнении работы, сотрудникам Отдела экологической и медицинской физиологии Института физиологии Коми НЦ УрО РАН за предоставленные данные по непрямой калориметрии, биохимическому анализу крови и за оказанную консультативную помощь при выполнении всех разделов работы.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ. СТРУКТУРА ЭНЕРГОТРАТ И ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ В УСЛОВИЯХ СПОРТИВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

1.1 Механизмы энергетической адаптации человека к природным факторам Севера

Северные районы характеризуются жесткими климатическими условиями, контрастной динамикой светового дня в течение года, более напряженной гелио-геомагнитной активностью, низкой среднегодовой температурой, своеобразием диеты и особым микро- и макроэлементным составом воды и почв. Влияние перечисленных факторов, как в комплексе, так и по отдельности, отражается на гомеостатической и эндокринной системах, а также метаболической реализации физиологических процессов (Авцын, 1985; Ткачев и др., 1992; Физиолого-биохимические основы..., 2005).

Главным определяющим климатическим фактором Севера, воздействующим на организм человека, является холодовой фактор, который усугубляется резкими перепадами ветрового режима и влажностью воздуха (Меерсон, 1981; Vallerand, Jacobs, 1989; Ruff, 1991; Ткачев и др., 1992;). Развитие адаптивного ответа при дефиците тепла и инсоляции сопровождается значительным повышением уровня метаболизма, направленного на поддержание температурного гомеостаза, на основе которого реализуются все последующие физиологические функции организма северян (Leonard et al., 2002; Бойко и др., 2007).

В условиях Севера наблюдается «циркумполярный гипоксический синдром», или «циркумполярная гипоксия» (Авцын, 1985). Существенный вклад в него вносит спазм верхних дыхательных путей при вдыхании морозного воздуха (Неверова, 1972; Нагибович и др., 2016). Повышение кислородного запроса тканей, охлаждение верхних и нижних дыхательных путей рефлекторно

учащает дыхание, делает его поверхностным, одновременно повышая бронхиальное сопротивление, что приводит к нарастанию удельного веса «мёртвого» пространства, снижению вентиляции альвеол, падению эффективности дыхания и усилению гипоксемии (Авцын, 1985; Гора, 2007). Ярким примером повышенного запроса организма в кислороде является «северная артериальная гипертензия малого круга кровообращения», или «северная легочная гипертензия» (Милованов, 1981; Авцын, 1985), возникающая в ответ на регионарную гипоксию в легких (Авцын, 1985). Отмечено, что гипоксия на Севере носит тканевой (метаболический) характер (Авцын, 1985; Хаснулин В., Хаснулин П., 2012) или смешанный, содержащий тканевый и дыхательный компоненты (Агаджанян, Ермакова, 1997). Тем не менее, целесообразнее рассматривать «циркумпольярную гипоксию» как комплексное явление, связанное с изменением функции, как внешнего дыхания, так и периферических механизмов транспорта кислорода. Так, по мнению ряда авторов, гипоксия на Крайнем Севере может быть вызвана кислородной недостаточностью и разреженностью воздуха (Намгаладзе, 2000; Мартынюк, 2007). Другие исследователи (Панин, 1975; Агаджанян, Ермакова, 1997; Хаснулин В., Хаснулин П., 2012) предполагают, что «циркумпольярная гипоксия» вызвана повышенным потреблением тканями кислорода, потенцированным повышением энергетического обмена в ходе адаптации к холоду. В результате компенсаторных реакций при гипоксии повышаются легочное сосудистое сопротивление и систолическое давление в легочной артерии, усиливается работа правых отделов сердца (Панин, 1975; Агаджанян, Ермакова, 1997). В условиях Севера формируется специфический «северный экотип» человека (Агаджанян, 1981), сопровождающийся изменением функционального состояния эндокринной системы и метаболизма в целом (Авцын, 1985; Панин, 1975, Бойко, 2005; Kolosova et al., 2023).

В условиях Севера выделяют следующие фазы адаптации: дестабилизация регуляторных и гомеостатических процессов (длительностью от полугода и

более), стабилизация и синхронизация регуляторных и гомеостатических процессов (длительностью 10-15 лет) и истощение резервных возможностей организма (Казначеев, 1980). В развитии приспособленности человека к Северу также отмечаются этапы срочной и долговременной адаптации. При развитии срочной адаптации активизируются гомеостатические системы организма; в результате активации симпатического отдела нервной системы (СНС) происходят катаболические реакции, которые снабжают необходимой энергией организм для адаптивных перестроек (Виру, 1981; Шуберт Э., Шуберт Е., 2008). Достижение долговременной адаптации у жителей Севера связано с перестройкой обменных энергетических процессов, завязанных на ферментных системах, а также формированием более экономного метаболического фона, или «северного» метаболического типа (Панин, 1975; Панин, 2010), необходимого для проживания в экстремальных условиях Севера (Хаснулин, 1998). В связи с этим, энергетический обмен переключается с углеводного на жировой, и организм переходит на «экономный» тип метаболизма (Панин, 1975). Сложная цепь адаптивных реакций приводит к формированию так называемого структурного следа адаптации (Меерсон, 1981), который связан с энергетическим обеспечением специфических механизмов (Панин, 1975; Меерсон, 1981; Панин, 2010).

Тиреоидная регуляция играет важную роль в адаптации организма к новым климатогеографическим условиям путем усиления гормонообразовательной функции щитовидной железы (Матюхин и др., 1986). Показано, что хроническое влияние низких температур на организм человека сопровождается активацией метаболизма тиреоидных гормонов, что проявляется в накоплении их свободных форм (Бойко и др., 2008). Установлено, что гормоны щитовидной железы повышают скорость клеточного метаболизма, а повышенный уровень этих гормонов важен для ускорения величины основного обмена (ВОО) у коренных жителей Севера. Причем предполагается, что группы коренных народов могут проявлять более выраженную активность гипоталамо-гипофизарной системы

зимой (Казначеев, 1980; Хаснулин, 1998; Snodgrass et al., 2007; Leonard et al., 2005; Особок et al., 2020). Проведенный генетический анализ (Mishmar et al., 2003; Ruiz-Pesini et al., 2004) указывает на дополнительные возможности, с помощью которых функция щитовидной железы может влиять на метаболическую адаптацию коренных северных популяций: изменчивость генов митохондриальной дезоксирибонуклеиновой кислоты связана с разобщением окислительного фосфорилирования. Гормоны щитовидной железы, по-видимому, играют центральную роль в регулировании метаболических реакций среди коренных северных групп населения. Кратковременные изменения уровня гормонов щитовидной железы важны для повышения скорости метаболизма в холодные зимние месяцы. Более того, гены, ответственные за разобщение окислительного фосфорилирования в митохондриях, могут регулировать скорость метаболизма (Leonard et al., 2005; Особок et al., 2020).

Первая систематическая оценка связи между энергетическим метаболизмом человека и температурой окружающей среды была представлена в начале 50-х годов (Roberts, 1952). Была обнаружена сильная отрицательная корреляционная связь между ВОО и средней годовой температурой, и высказано предположение о том, что адаптация к региональным климатическим стрессовым факторам играет важную роль в объяснении вариабельности энергетического обмена (Roberts, 1952; Особок et al., 2020). Известно, что ВОО у коренных жителей Севера выше на 30% по сравнению с жителями умеренных широт (Казначеев, 1980; Хаснулин, 1998; Leonard et al., 2002; Snodgrass et al., 2005; Steegmann, 2007; Снодграсс и др., 2011). Такое увеличение может быть объяснено тиреоидной регуляцией, пищевым термогенезом (ПТ), связанным с потреблением высокого уровня животного белка; акклиматизацией к холодному стрессу и генетической адаптацией к климатическим условиям среды, вызванной естественным отбором (Leonard et al., 2005; Особок et al., 2020). Повышение ВОО, по предположениям ученых (Казначеев, 1980; Хаснулин, 1998; Snodgrass et al., 2005), является физиологической адаптацией к

«северному» стрессу, обусловленному влиянием метеорологических и гелиогеофизических факторов. Высокий уровень энергетического обмена, в свою очередь, сопровождается значительным потреблением и расходом липидов. Большое значение в активации липидного обмена на Севере имеют липиды (фосфолипиды, жирные кислоты (ЖК), триглицериды и холестерин), которые играют важную регуляторную роль в адаптации к низким температурам окружающей среды путем изменения вязкости мембран клеток (Бойко, 2005; Коломийцева, 2011).

Липидный обмен «северного» метаболического типа характеризуется сдвигом липопротеинового спектра в сторону относительного повышения липопротеинов высокой плотности, что ассоциировано с более высокой активностью липопротеинлипазы, локализованной на поверхности эндотелия сосудов, способствующей формированию липопротеинов высокой плотности (Севостьянова, 2013). Известно, что одним из важнейших молекулярных механизмов адаптации к северным условиям является изменение интенсивности перекисного окисления липидов (ПОЛ) (Бойко, Бичкаева, 2000) и метаболизма ЖК (Lyudinina et al., 2014). Адаптивные перестройки ПОЛ у человека на Севере характеризуются изменениями в механизмах регуляции перекисного окисления и антиоксидантной защиты в организме. Установлено (Никитин и др., 1981; Петрова и др., 1995), что уровень ПОЛ, как у коренного, так и у пришлого населения Крайнего Севера, выше, чем у населения, живущего в средних широтах. Вместе с тем, у коренного населения Крайнего Севера выявлены более высокая антиокислительная активность липидов крови и более низкое содержание вторичных продуктов ПОЛ, чем у пришлых жителей. Высокий уровень эндогенных антиоксидантов у коренного населения свидетельствует об их широких резервных возможностях, эволюционно выработанных многими поколениями арктических аборигенов (Никитин и др., 1981; Петрова и др., 1995; Бойко и др., 2007).

Многие авторы (Бойко и др., 2008; Ефимова, Кудряшова, 2009) особое значение уделяют изучению жирорастворимых витаминов именно в условиях Северных территорий. По данным обследований взрослого трудоспособного населения, из 70-98% обследованных лиц имеют дефицит витамина D (Коденцова и др., 2010; Потолицина, Бойко, 2018), что может стать причиной тяжелых нарушений обмена веществ и функций различных органов и систем. Литературные данные (Бойко, 2005) показали, что гиповитаминоз носит поливитаминный и круглогодичный характер, поскольку в биохимических трансформациях метаболизма у северян большую роль играют процессы свободнорадикального окисления (СРО) (Guilbert, 2002). Полученные данные (Запесочная, Автандилов, 2008) позволяют освятить роль СРО в развитии адаптационных и дезадаптационных процессов у пришлого населения Севера. Установлено, что в механизме воздействия на организм факторов окружающей среды и условий жизнедеятельности имеется общее патогенетическое звено – избыточное накопление свободных радикалов (Запесочная, Автандилов, 2008). Не исключено и то, что попадание в организм различных химических веществ – прооксидантов обуславливает генерацию свободных радикалов в количествах, значительно превышающих ресурсные возможности антиоксидантной системы (Бышевский и др., 2008; Хаснулин В., Хаснулин П., 2012). Кроме того, оказалось, что одним из факторов неадаптивного усиления процессов СРО является развитие у пришлого населения высоких широт так называемого «северного метаболического типа» обмена веществ, требующего большего использования в метаболических процессах белковых, жировых компонентов и снижения доли усвоения углеводов (Угл) (Панин, 2010). При этом у здоровых коренных жителей, наиболее хорошо адаптированных к неблагоприятному климату, было выявлено переключение энергетического обмена с «углеводного» типа на «жировой» с преимущественным использованием экзогенного пищевого жира (Бойко, 2005; Панин, 2010, Людина, 2014). Установлено, что итогом адаптации может быть, с одной стороны, функциональная перестройка всех систем

организма с образованием нового уровня тесных взаимоотношений между генетическим аппаратом и морфофункциональными свойствами органов и тканей (Хаснулин В., Хайснулин П., 2012). А с другой стороны, при нарушении равновесия в системе прооксиданты/антиоксиданты, происходит своеобразный разлад в согласованном участии приспособительных механизмов и наступает развитие дезадаптационного синдрома (Саввинов и др., 2005).

Еще одним приспособительным механизмом к холодovому фактору может являться уровень лептина в крови, который играет ключевую роль в терморегуляции. Лептин был первым адипокином, обнаруженным у человека. Он играет важную роль в регулировании энергетического гомеостаза, а также влияет на некоторые другие физиологические процессы. Было обнаружено, что лептин может увеличивать экспрессию генов, разобщающих окислительное фосфорилирование (Nikanorova et al., 2020) в митохондриях и стимулировать окисление ЖК (Lee et al., 2002; Minokoshi et al., 2002). Известно, что механизм терморегуляции и потемнения жировой ткани (трансдифференции) за счет лептина связан с нейронами проопиомеланокортина (ПОМК) в дугообразном ядре (Andersson et al., 2000; Kindblom et al., 2009; Suyila et al., 2013). Благодаря механизму лептин-зависимого нейро-жирового связывания несократительного термогенеза в буром жире лептин и его рецепторы в дугообразном ядре гипоталамуса увеличивают активность нейронов ПОМК, запуская производство и высвобождение меланоцит-стимулирующего гормона. Этот гормон активирует рецепторы меланокортина-3 и 4, что увеличивает активность СНС и приводит к повышенной экспрессии разобщающего белка 1 в буром жире (Commins et al., 2000; Cowley et al., 2001). В бурой жировой ткани норадреналин высвобождается в ответ на сигналы гипоталамуса, которые активируются холодovыми рецепторами кожи. Кроме того, во внешней мембране коричневых жировых клеток норадреналин активирует через адреналовые рецепторы аденилатциклазу в цитозоле этих клеток с образованием циклического аденозинмонофосфата (цАМФ). Посредством каскада протеинкиназ цАМФ активирует триглицерид-

липазу с образованием свободных ЖК. Высвободившиеся свободные ЖК реагируют с РБ 1, при этом вся энергия от сгорания субстрата (пищи) выделяется непосредственно в виде тепла (Klingenberg, 1990; Skulachev, 1999; Morrison et al., 2014).

Таким образом, в условиях Севера механизмы долговременной адаптации достигаются путем напряжения физиологических функций и сопровождаются сложными перестройками гомеостатических систем в организме, которые заключаются в активизации энергетических обменных процессов. При этом важно комплексно рассматривать влияние факторов Севера на организм человека, учитывая при этом сезонную периодичность и возрастание экстремальности факторов при продвижении к полюсу, поскольку устойчивое существование организма в условиях Севера возможно лишь при стабильном состоянии гомеостаза, во главе которого находится кислородно-энергетический баланс.

1.2 Оценка энерготрат и энергопотребления у спортсменов

Нагрузки в современном спорте, выполняемые на пределе физиологических возможностей, в сочетании с нервно-психическим напряжением приводят к возникновению глубоких биохимических и функциональных сдвигов, резко снижающих физическую работоспособность (Волков и др., 1995; Михайлов, 2008). В связи с этим, результативное выступление спортсменов требует не только правильного построения тренировочного процесса, но и постоянного проведения медико-биологической диагностики функционального состояния (Phillips et al., 1996; Головачев и др., 2003). Несмотря на разработанные международные рекомендации по питанию (Kerksick et al., 2018; Jagim et al., 2021; Методические рекомендации..., 2023), большинство спортсменов по-прежнему испытывают энергодефицит в разные периоды годичного цикла. Отсутствие согласованного ЭП, соизмеримого с энерготратами, у спортсменов сопровождается негативными эффектами,

влияющими на физическую работоспособность, особенно в подготовительный период, что приводит к низкой результативности и в период соревнований (Heydenreich et al., 2017; Wasserfurth et al., 2020).

1.2.1 Структура суточных энергозатрат

Суточный расход энергии нетренированного человека складывается из двух основных компонентов (рисунок 1): ЭТП и энергозатрат вне покая, которые включают в себя ПТ; энергозатраты при физической нагрузке; и без нее (Levine, 2005; Maclean et al., 2011; Westerterp, 2013; Blasco Redondo, 2015).

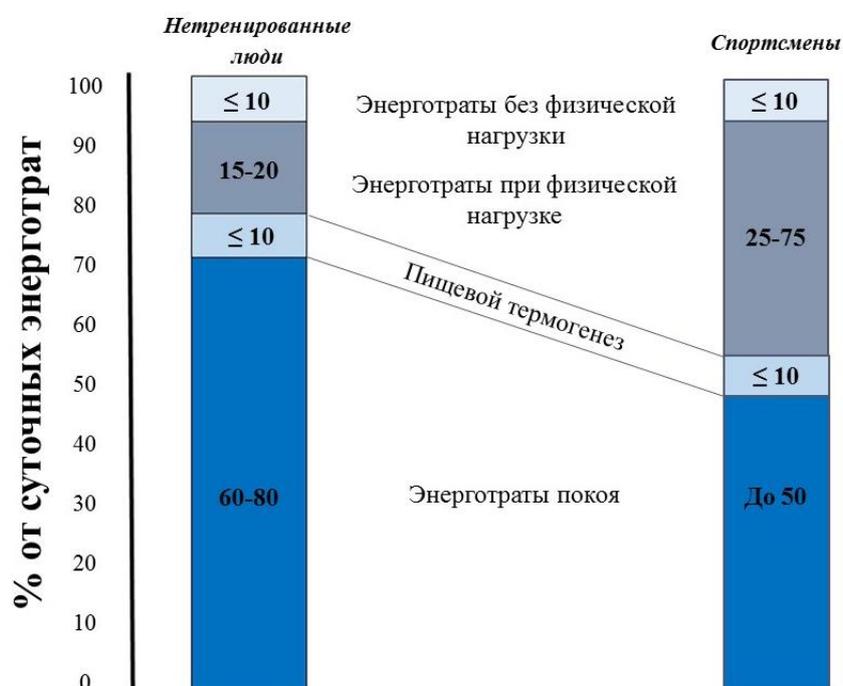


Рисунок 1 – Структура суточных энергозатрат у нетренированных людей и спортсменов (авторский рисунок).

У спортсменов процентное соотношение компонентов энергозатрат меняется в силу специфики спортивной деятельности и проявляется в снижении ЭТП до 50% суточных энергозатрат (Esteves de Oliveira et al., 2008; Maclean et al., 2011), в основном, за счет увеличения энергозатрат при физических нагрузках, которые варьируют в пределах 25-75% суточных энергозатрат (Blasco Redondo,

2015) в зависимости от периода годового цикла (Heydenreich et al., 2017; MacKenzie-Shalders et al., 2020).

Поскольку ЭТП – важный компонент суточных энергозатрат спортсменов (Purcell et al., 2020) измерение и интерпретация ЭТП являются важной составляющей для построения эффективного тренировочного процесса (Сидун, Филатова, 2016; MacKenzie-Shalders et al., 2020). Значения ЭТП варьируют от 60 до 80% суточных энергозатрат у малоподвижных взрослых людей, в то время как у физически активных лиц, в том числе спортсменов, они составляют примерно 50%, изменяясь в зависимости от состава тела, особенно от БМТ (Levine, 2005; Esteves de Oliveira et al., 2008).

По данным литературы (Levine, 2005; Blasco Redondo, 2015) ВОО отличается меньше чем на 10% от ЭТП (Levine, 2005; Blasco Redondo, 2015; MacKenzie-Shalders et al., 2020). При этом, измерение ЭТП проводят после стандартного завтрака, а не натощак, как ВОО (Blasco Redondo, 2015). Причем оба термина, как правило, используются неточно, хотя в настоящее время в зарубежной литературе наиболее часто встречается – ЭТП (Levine, 2005; Blasco Redondo, 2015; Silva et al., 2017).

Обычно ВОО определяют с помощью уравнений прогнозирования (Jagim et al., 2018). Расчетные методики удобны в использовании и не требуют сложной аппаратуры, однако они менее информативны и имеют большую погрешность, по сравнению с непрямой калориметрией, которая является золотым стандартом при определении энергозатрат (Jagim et al., 2018; MacKenzie-Shalders et al., 2020; Purcell et al., 2020). Широко используемые уравнения прогнозирования ВОО (таблица 1) были сопоставлены с ЭТП, полученными методом непрямой калориметрии у спортсменов мужского и женского пола (Jagim et al., 2018).

Установлено, что уравнения прогнозирования недооценивают значения ЭТП, тем не менее уравнение Харриса-Бенедикта наиболее точно рассчитывает ВОО у спортсменов-мужчин, в то время как уравнение Каннингема – у спортсменов-женщин (Jagim et al., 2018).

Таблица 1 – Уравнения прогнозирования величины основного обмена: используемые в практике (Jagim et al., 2018)

Уравнение	Формула ВОО	%
Nelson	$25.80 \times \text{БМТ (кг)} + 4.04 \times \text{ЖМТ (кг)}$	М: 15; Ж: 15
Mifflin-St. Jeor	$9.99 \times \text{МТ (кг)} + 6.25 \times \text{рост (см)} - 4.92 \times \text{возраст (годы)} + 166 \times \text{пол (М, 1; Ж, 0)} - 161$	М: 19; Ж: 10
Harris-Benedict	М: $66.47 + 13.75 \times \text{МТ (кг)} + 5 \times \text{рост (см)} - 6.76 \times \text{возраст (годы)}$ Ж: $655.1 + 9.56 \times \text{МТ (кг)} + 1.85 \times \text{рост (см)} - 4.68 \times \text{возраст (годы)}$	М: 12; Ж: 8
De Lorenzo Equation	$- 857 + 9 \times \text{МТ (кг)} + 11.7 \times \text{рост (см)}$	М: 14; Ж: 10
Cunningham	$500 + 22 \times \text{БМТ (кг)}$	М: 15; Ж: 7

Примечание: БМТ – безжировая масса тела, ЖМТ – жировая масса тела, МТ – масса тела, ВОО – величина основного обмена, М – мужской пол, Ж – женский пол, % – процентная разница между измеренной и рассчитанной величиной основного обмена.

В недавнем исследовании (Marra et al., 2021) была предпринята успешная попытка разработки новых уравнений прогнозирования ВОО у элитных спортсменов на основе антропометрических параметров, а также исходных переменных, полученных по результатам БИА, в частности фазового угла БИА.

Среди факторов, оказывающих наиболее значимое влияние на ЭТП, является физическая нагрузка, однако результаты исследований на эту тему противоречивы. У тренированных людей по сравнению с нетренированными ЭТП были выше (Lee et al., 2009) или одинаковы (Burne, Wilmore 2001). Частично такие неоднозначные результаты могут быть связаны с расхождениями в методах исследований, например, может варьироваться интенсивность и продолжительность физической нагрузки, как и время, между последней тренировкой и измерением ЭТП. Другими возможными причинами противоречивых выводов могут стать малый размер выборки, подбор

неоднообразных единиц измерения ЭТП (Byrne, Wilmore 2001; Lemmer et al., 2001), отсутствие группы сравнения в исследовании (Lemmer et al., 2001), а также игнорирование сезонных колебаний ЭТП, которые объясняют до 17% индивидуальных вариаций. Все вышеизложенное может затруднить интерпретацию получаемых данных (Plasqui et al., 2003).

Среди механизмов, регулирующих ЭТП, первостепенное значение принадлежит гормонам щитовидной железы (тироксина и трийодтиронина). Липолиз, индуцированный норэпинефрином, синтез белка, ресинтез гликогена (McNab, 2019) и БМТ (Byrne, Wilmore 2001) также лежат в основе вариабельности ЭТП. Кроме того, известно, что наследственная изменчивость частично объясняет расхождения результатов влияния физической нагрузки на ЭТП (McNab, 2019), делая этот вопрос более сложным.

Известно, что специфическое динамическое действие пищи или ПТ является отображением физиологических и метаболических особенностей усвоения макронутриентов, которые важно учитывать при составлении рациона (Westerterp, 2013; Blasco Redondo, 2015). Величина ПТ составляет около 10% общих суточных энергозатрат человека (Levine, 2005; Maclean et al., 2011). Интенсивность и продолжительность ПТ зависят от количества и химического состава потребленной пищи. Так, ПТ увеличивает ЭТП в среднем на 5-10% для Угл, 0-5% для жиров и 20-30% для белков (Blasco Redondo, 2015; Morris, Mohiuddin 2023). Поэтому величину ПТ, как и ЭТП, можно использовать в качестве индивидуального показателя энергетического обмена, а особенности термогенеза основных макронутриентов целесообразно рассматривать как дополнительный критерий метаболического или энергетического статуса организма (Westerterp, 2013).

На ПТ оказывают влияние возраст, физическая активность, состав, частота и время приема пищи (Calcagno et al., 2019). С возрастом значения ПТ снижаются (Jones et al., 2004; Du et al., 2014), что может объясняться снижением физической активности и накоплением жира у пожилых людей. Физическая активность

увеличивает значения ПТ независимо от возраста, так при сравнении показателей физически активных мужчин разных возрастных категорий, было установлено, что ПТ на 45% выше в активной молодой группе и на 31% выше в активной пожилой группе по сравнению с их соответствующими возрастными группами, ведущими малоподвижный образ жизни (Calcagno et al., 2019).

После приема пищи интенсивность обмена веществ и энерготраты организма увеличиваются по сравнению ВОО в строгой зависимости от энергетической ценности потребляемой пищи и её компонентного состава (Blasco Redondo, 2015; Morris, Mohiuddin 2023). Ранее было показано (Binns et al., 2015), что пищевая нагрузка, содержащая 200-1000 ккал, сопровождается повышением ЭТП примерно на 10% по сравнению с исходным значением через 1 час после приема пищи. В другом исследовании сравнение ЭП разной калорийности (450 ккал, 1000 ккал и 1500 ккал) показало увеличение ЭТП от исходного уровня соответственно на 9%, 21% и 33% (Calcagno et al., 2019). Недавнее проведенное нами исследование (Бушманова и др., 2023) по влиянию пищевой нагрузки (300 ккал) с высоким содержанием Угл (91%) не выявило значимых отличий в значениях ЭТП до и после тестового завтрака у обследуемых, что позволяет проводить измерение ЭТП среди спортсменов после стандартизированного углеводного завтрака, калорийность которого не превышает 300 ккал.

В похожих работах сравнение низкокалорийного ЭП (195 ккал) с высоким содержанием жиров и высококалорийного ЭП (700 ккал) с низким содержанием жиров показало более высокие значения ПТ при высококалорийном ЭП (Quatela et al., 2016). В тоже время, рацион питания с идентичной калорийностью, но высокой долей Угл и жиров, сопровождался повышением ПТ на 96% для высокоуглеводной пищевой нагрузки (Bowden, McMurray, 2000) и на 16% для высокожировой (Thyfault et al., 2004) по сравнению исходным (натошачковым) уровнем. Аналогичное исследование, проведенное среди здоровых молодых мужчин, также показало, что ПТ выше на 32% при ЭП с высоким содержанием

Угл по сравнению с высоким содержанием жиров (Nagai et al., 2005). Предположение о том, что для прохождения по желудочно-кишечному тракту продуктов с высоким содержанием клетчатки требуется больше энергии, было подтверждено в контролируемом исследовании (Calcagno et al., 2019), где после пищевой нагрузки (720 ккал) провели измерение ПТ, а затем участники добровольно придерживались веганской диеты в течение 14 недель. Повторное тестирование показало увеличение ПТ на 16% в группе веганов по сравнению с группой сравнения (Calcagno et al., 2019).

Высказано предположение, что вкусовые качества продуктов, могут повышать симпатическую активность, тем самым увеличивать ПТ (Barnard et al., 2005). Однако не было выявлено различий в ПТ при сравнении вкусных и невкусных блюд (Prat-Larquemin et al., 2000). Также установлено (Hamada et al., 2014), что медленная продолжительность приема пищи и тщательное пережевывание значительно увеличивают ПТ через 90 минут. Это может быть связано с постпрандиальным спланхическим кровообращением после еды, которое сопровождается увеличением общего потребления кислорода организмом (Hamada et al., 2014).

Энерготраты при физических нагрузках у спортсменов могут варьироваться от 25 до 75% суточных энерготрат (Levine, 2005; Maclean et al., 2011; Westerterp, 2013; Blasco Redondo, 2015) в зависимости от интенсивности и продолжительности выполняемой физической нагрузки, вида спорта, периода годового цикла, достигая в среднем 4000-7000 ккал/сут (Heydenreich et al., 2017). Наибольшие значения энерготрат при физических нагрузках отмечаются у спортсменов циклических видов спорта, требующих проявления аэробной выносливости, например, у марафонцев, велогонщиков, лыжников и триатлонистов (Silva et al., 2017).

С ростом спортивного мастерства величина энерготрат при выполнении стандартной физической нагрузки уменьшаются. Кроме того, уровень энерготрат существенно зависит от эмоционального состояния спортсмена. В

период ответственных соревнований энерготраты при выполнении физических нагрузок увеличиваются в среднем на 25-30% по сравнению с аналогичной тренировочной нагрузкой. Энерготраты при физических нагрузках значительно варьируют от массы тела, поэтому для сравнения энерготрат целесообразно использовать не суммарные абсолютные значения расхода энергии, а относительные, рассчитанные на килограмм массы тела (Орлов, 2022).

Аэробный распад Угл и ЖК является основным источником энергии для ресинтеза аденозинтрифосфата (АТФ) во время физических нагрузок в скелетной мускулатуре (Monferrer-Marín et al., 2022). Абсолютный и относительный вклад этих субстратов в энергообеспечение физической нагрузки может зависеть от возраста, степени тренированности, режима питания, продолжительности и интенсивности нагрузки, а также от пола (Fritzen et al., 2020; Monferrer-Marín et al., 2022; Brun et al., 2022).

Показано (San-Millán, Brooks, 2018; Tareen et al., 2019; Yang et al., 2022), что у элитных спортсменов, тренирующих выносливость, хорошо выражен мышечный митохондриальный ретикулум (Glancy et al., 2015), что обуславливает метаболическую гибкость организма – способность переключаться между окислением липидов и Угл в зависимости от потребности в энергии и доступности субстрата при физических нагрузках (San-Millán, Brooks, 2018; Tareen et al., 2019; Yang et al., 2022). Спортсмен во время аэробной нагрузки получает относительно больше энергии за счет окисления жиров и соответственно меньше за счет окисления Угл по сравнению с нетренированными лицами. Такой субстратный энергетический сдвиг в сторону преимущественного использования жиров может быть обозначен как «жировой сдвиг» (или активизация метаболизма липидов), который позволяет элитным спортсменам экономичнее расходовать лимитированный мышечный гликоген и тем самым отодвигать момент его истощения, а, следовательно, повышать продолжительность выполнения физической нагрузки и развивать выносливость (Da Boit et al., 2017; San-Millán, Brooks, 2018).

Таким образом, ЭТП являются главным компонентом суточных энерготрат, что свидетельствует о важности изучения и их динамики в ходе тренировочного процесса с учетом влияния физических нагрузок, сезонности и гормональной регуляции. Рекомендуется проводить оценку ЭТП с помощью метода непрямой калориметрии. В случае, когда данное оборудование недоступно, можно воспользоваться уравнениями прогнозирования с наименьшим процентом занижения получаемых данных. Дополнительные энерготраты организма на всасывание и утилизацию пищи описываются ПТ, который имеет тенденцию к снижению с возрастом. Напротив, физическая активность, высококалорийные блюда или пища с высоким содержанием Угл, клетчатки и белков, как правило, повышают ПТ. Время и продолжительность приема пищи могут изменять ПТ, но в какой степени, пока неясно, в то время как вкусовые качества значимо не влияют на ПТ. Объем энерготрат при физических нагрузках варьирует в диапазоне 25-75% от суточных энерготрат. Главными метаболическими субстратами являются Угл и жиры, вклад в энергообеспечение физической нагрузки которых зависит от продолжительности и интенсивности нагрузки, питания, возраста, пола, степени тренированности и специфики вида спорта.

1.2.2 Энергопотребление

Среди ключевых факторов, оказывающих влияние на функциональное состояние и физическую работоспособность спортсменов, является питание (Kerksick et al., 2018; Jagim et al., 2021). Адекватное ЭП, как основа энергетического обеспечения организма спортсменов во время физических нагрузок, помогает поддерживать оптимальную спортивную форму, регулировать компонентный состав тела спортсменов, а также определяет способность организма усваивать макро- и микронутриенты (Malsagova et al., 2021). Исследования показывают (Vitale, Getzin, 2019; Jagim et al., 2021), что

спортсменам в подготовительный период необходимо ЭП не менее 5000 ккал/сут, а при интенсивных физических нагрузках эти значения могут возрастать (Vitale, Getzin, 2019; Jagim et al., 2021). В соревновательный период ЭП может варьировать в пределах 6000-7000 ккал/сут (Kerksick et al., 2018; Jagim et al., 2021). В некоторых случаях во время соревновательного периода значения ЭП могут снижаться в силу непрерывного характера соревнований, когда спортсмены в перерывах на отдых восполняют энергетические резервы исключительно за счет спортивных напитков, гелей и энергетических батончиков (Hulton et al., 2010).

Оценка ЭП – одна из самых трудоемких методик при работе с респондентами в исследованиях, требующая особой тщательности и аккуратности. Спортсмены представляют группу населения с особыми потребностями в питании, поэтому важно грамотно оценивать их ЭП для определения пищевого статуса в течение всего годового цикла. При этом не стоит игнорировать ряд проблем, возникающих при самостоятельной оценке ЭП спортсменами, главной из которых является степень занижения данных, составляющая 10-45% суточных энергозатрат. Причем масштабы занижения данных возрастают по мере увеличения потребности в энергии (Magkos, Yannakouliа, 2003). Спортсмены, тренирующие выносливость, отличаются значительными суточными энергозатратами, что, вероятно, делает их более подверженными к занижению сведений о ЭП (Heydenreich et al., 2013).

Обязательным дополнением к сбору данных о питании, независимо от используемого метода, является регистрация поведенческих факторов (уровня физической активности, статуса курения, уровня потребления алкогольной продукции и др.), а также антропометрических характеристик, анализ компонентного состава тела, сбор лабораторных и инструментальных данных (Карамнова и др., 2021). Общепринятые инструменты, используемые для оценки ЭП, можно разделить на две категории (Magkos, Yannakouliа, 2003): ретроспективные и проспективные (таблица 2).

Таблица 2 – Инструменты для оценки энергопотребления спортсменов (Magkos, Yannakouliа, 2003)

Метод	Описание	Преимущества	Недостатки
Ретроспективные			
Метод 24-часового воспроизведения рациона питания	Заключается в установлении количества фактически потребленных пищевых продуктов и блюд за предыдущие сутки посредством опроса (интервью)	Прост в использовании Быстрота сбора информации Низкая нагрузка на респондентов Минимальное искажение ЭП при стандартизации процедуры Недорогой	Однократное проведение интервью позволяет получить только средние показатели ЭП Требуется квалифицированный диетолог Точность метода зависит от памяти респондентов
Метод оценки частоты потребляемой пищи	Респондент выбирает в вопроснике подходящую категорию частоты потребления («один раз в месяц», «один раз в неделю» и др.) из конкретных пищевых продуктов и блюд, указанных в вопроснике	Простота и самостоятельность использования Позволяет получить качественные характеристики Получение данных о типичном питании респондентов за длительный период времени Недорогой	Точность метода зависит от памяти респондентов Ограниченный список продуктов питания снижает точность количественной оценки ЭП
Метод пищевого анамнеза (история питания, диетanamнез)	Респондент подробно описывает потребление пищи в обычный день в типичные для него приемы пищи, характер продуктов и блюд, их количество, а также отмечает возможные замены этих продуктов в другие дни недели или иные отклонения в питании, что дополняется применением метода 24-часового воспроизведения и 3-дневной записью питания, и заполнением проверочного частотного опросника	Содержит информацию о качественных и количественных аспектах обычного рациона питания Фиксирует повседневные и сезонные колебания	Занимает много времени Трудоемкий В России данный метод не проработан и не используется

Перспективные			
Метод взвешенной диетической записи (метод меню-раскладок)	Заключается в измерении и регистрации всех принятых блюд и продуктов (взвешиваются приготовленные для потребления блюда, продукты и напитки, а также несъеденные остатки) во все приемы пищи в течение суток, подробно записываются рецепты приготовленных блюд с пометкой количества порций в расчете рецепта, регистрация проводится в течение нескольких последовательных суток (3-7 сут)	Повышенная точность	Необходимость обучения обследуемых по корректному ведению записей Обеспечение обследуемых специальными весами Высокая нагрузка на респондентов Обычный прием может быть изменен Дорогостоящий и отнимающий много времени
Метод регистрации с оценкой количества потребленной пищи (метод диетических записей)	Заключается в письменной детальной регистрации всех продуктов, напитков, ингредиентного состава сложных блюд (в момент употребления), способы приготовления и размер порций в бытовых мерах веса и объема в течение нескольких последовательных суток (3-7 сут)	Приемлемая точность	Обычный прием может быть изменен
Комбинированный метод	Позволяет использовать комплекс методик оценки питания	Позволяет изучать рацион в более полном объеме Получение большого количества характеристик для последующего анализа данных и их использования с меньшими затратами	Включает в себя недостатки всех вышеперечисленных методов оценки ЭП

Примечание: ЭП – энергопотребление.

Каждая из методик (таблица 2) имеет свои преимущества и ограничения в использовании. Ретроспективные методы оценки ЭП зависят от памяти респондентов и показывают высокую погрешность по сравнению с проспективными методами (Magkos, Yannakouliа, 2003).

В настоящее время существуют общие рекомендации для спортсменов (таблица 3) по потреблению Угл, белков и жиров, основанные на рекомендациях по низкому, умеренному и высокому уровню физической активности (Kerksick et al., 2018; Jagim et al., 2021; Методические рекомендации..., 2023).

Таблица 3 – Рекомендации по питанию спортсменов в зависимости от уровня физической активности (Jagim et al., 2021)

Показатель	Физическая активность	Рекомендации для спортсменов-мужчин	Рекомендации для спортсменов-женщин
Энергетическая ценность, ккал/сут	Низкая	3500-4000	2500-3000
	Средняя	4500-5000	3500-4000
	Высокая	5500-6000	4500-5000
Относительная энергетическая ценность, ккал/сут/кг массы тела	Низкая	40	40
	Средняя	50	50
	Высокая	60	60
Углеводы, г/сут	Низкая	350-400	250-300
	Средняя	450-600	350-500
	Высокая	650-800	550-600
Углеводы, г/сут/кг массы тела	Низкая	4	4
	Средняя	6	6
	Высокая	8	8
Белки, г/сут	Низкая	100-140	90-100
	Средняя	150-160	110-120
	Высокая	170-180	125-130
Белки, г/сут/кг массы тела	Низкая	1.4	1.4
	Средняя	1.6	1.6
	Высокая	1.8	1.8
Жиры, г/сут	Низкая	50-70	40-60
	Средняя	90-100	70-80
	Высокая	110-130	90-100
Жиры, % от энергетической ценности рациона	Низкая	15	15
	Средняя	25	25
	Высокая	30	30

Спортсменам, тренирующим выносливость, в дни регулярных интенсивных физических нагрузок допускается повышенное потребление жиров (примерно до 30-50% дневной нормы калорий) (Vitale, Getzin, 2019). Когда спортсмен стремится сократить %ЖМТ, постулируется что ежедневное потребление жиров от общего количества калорий может составлять не более 20% в подготовительный период и не более 30% в соревновательный период (Kerksick et al., 2018; Jagim et al., 2021). Любой спортсмен обладает жировыми запасами, достаточными для выполнения непрерывной физической нагрузки в течение длительного времени (Thielecke, Blannin, 2020). Однако способность использовать их во время марафона зависит от многих факторов: аэробной подготовленности спортсмена, ферментной активности, интенсивности физической нагрузки, углеводных запасов, индивидуальных особенностей организма и стратегий питания (Thielecke, Blannin, 2020). Поэтому для поддержания высокой физической работоспособности спортсмену необходимо восполнять запасы углеводов, внутримышечных триглицеридов и потреблять адекватное количество незаменимых ЖК (Thielecke, Blannin, 2020; Физиолого-биохимические механизмы..., 2019; Lyudinina et al., 2020). Когда потребление основных макронутриентов не соответствует международным нормам физиологической потребности организма в основных пищевых веществах и энергии для атлетов (Jagim et al., 2021), спортсмены имеют более низкую активность антиоксидантных ферментов и уровень кортизола, повышенное повреждение клеток, что в целом может привести к снижению работоспособности и вызвать травмы (Физиолого-биохимические механизмы..., 2019).

Таким образом, организация рационального питания играет важную роль в системе подготовки высококвалифицированных спортсменов, поскольку лежит в основе высокой работоспособности и профилактики заболеваний. Соответствующее ЭП также является важнейшим фактором, повышающим функциональные резервы организма, что, наряду с грамотно построенным тренировочным процессом, приводит к высоким спортивным результатам. В настоящее время существуют рекомендации по потреблению Угл, белков и жиров

в разные периоды тренировочного процесса, разработанные Международным обществом спортивного питания. Но остается до конца неясным действительно ли спортсмены, тренирующие выносливость, соблюдают эти рекомендации в разные периоды годового цикла.

1.2.3 Годичный цикл и суточные энерготраты

Обычно годичный цикл элитного спортсмена, тренирующего выносливость, делится на периоды, которые необходимы для развития максимальной физиологической адаптации к физическим нагрузкам и выведения спортсмена на пик формы к соревновательному периоду (Issurin, 2010). Принцип периодизации годового цикла был впервые предложен тренером Львом Матвеевым (Матвеев, 1965) и с тех пор принципиально не изменился. В основе этой модели лежит подготовка спортсмена к одному или нескольким крупным соревнованиям в течение года путем разделения тренировочного процесса на три основных периода (макроцикла): подготовительный, соревновательный и переходный (Матвеев, 1965).

Начало подготовительного периода характеризуется преимущественно физической нагрузкой умеренной интенсивности, что развивает выносливость. Напротив, к концу подготовительного периода объем физических нагрузок уменьшается, а интенсивность постепенно увеличивается с целью достижения максимальной работоспособности и переноса тренировочных эффектов в соревновательный период, где интенсивность физической нагрузки максимальна. После соревновательного периода следует переходный период, который сопровождается низкоинтенсивными и низкообъемными физическими нагрузками с целью восстановления и подготовки спортсмена морально и физически к следующему годовому циклу (Матвеев, 1965; Issurin, 2010).

Концепция периодизации годового цикла в элитных видах спорта на выносливость была создана давно, тем не менее связь физической нагрузки с энергетическими обменными процессами, питанием и составом тела в разные

периоды тренировочного процесса получила научное понимание только недавно (Heydenreich et al., 2017).

Суточные энерготраты подготовительного периода варьируют в пределах 2000-9000 ккал/сут, в то время как в соревновательный период могут возрастать до 14000 ккал/сут (Heydenreich et al., 2017). Так, в исследовании, посвященном одному бегуну, средние значения суточных энерготрат оценивались в 17965 ± 2165 ккал/сут (Knechtle et al., 2005). Обследование велосипедистов, участвующих в Тур де Франс, зафиксировало средние значения энерготрат свыше 6000 ккал/сут (Saris et al., 1989).

Значения суточных энерготрат меняются в зависимости от выбранных методов их расчёта, каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения. Преимущества определяются главным образом возможностью проводить измерения в условиях свободной обычной жизни, не нарушая привычный распорядок дня, не влияя на психическое и физическое состояние. Недостатки в большинстве случаев обусловлены ограничениями использования, недостаточным обеспечением точности, повторяемости, воспроизводимости. В настоящее время наиболее информативным является способ расчета энерготрат с помощью комбинированных методов, таких как непрямая калориметрия, пульсометрия и акселерометрия (Lyristakis et al., 2019; Plasqui, 2022).

Непрямая калориметрия является широко используемым методом определения энерготрат, в основе которого лежит измерение объема вдыхаемого и выдыхаемого газа, а также концентраций кислорода и углекислого газа (Plasqui, 2022). Для сбора газов используются различные устройства, включая мешок Дугласа, балдахин и лицевую маску (Zusman et al., 2019; Plasqui, 2022). Непрямая калориметрия является точным и неинвазивным методом, который позволяет оценить расход энергии в полевых условиях за счет использования портативных метаболических систем (Stenbäck et al., 2021; Dasa et al., 2022).

Пульсометры являются популярными среди исследователей, поскольку они обладают относительно низкой стоимостью, неинвазивным характером и универсальностью. Их использование обеспечивает объективную и вполне надежную информацию об энерготратах, интенсивности и продолжительности

физической нагрузки на основе взаимосвязи между частотой сердечных сокращений и потреблением кислорода (Germini et al., 2024).

Последние достижения в области электронных технологий позволили разработать акселерометры, используемые в качестве одного из способов измерения расхода энергии при физических нагрузках. Расчет основан на измерении ускорения тела, которое представляет собой изменение скорости с течением времени и выражается в единицах, кратных силе тяжести ($g=9,8 \text{ м/с}^2$) (Stenbäck et al., 2021).

Метод двойной маркировки воды с использованием стабильных изотопов кислорода (^{18}O) и водорода (^2H) стал золотым стандартом для измерения суточных энергозатрат (Kinnunen Stenbäck et al., 2021). В дополнение к своей высокой точности, данный метод обладает неинвазивным характером и возможностью для обследуемых продолжать свою обычную деятельность в течение периода измерения без дополнительной нагрузки. Однако к ограничениям метода можно отнести высокую стоимость и представление усредненных значений суточных энергозатрат за период измерения без конкретных сведений о физической активности (Park et al., 2014).

Суточные энергозатраты также можно оценить путем умножения коэффициента физической активности (КФА) на ЭТП, определенные непрямой калориметрией или рассчитанные на основе уравнения прогнозирования. Диапазон КФА для спортсменов, как правило, составляет от 2 до 2.5, причем окончательная выбор КФА требует качественной оценки уровня физической активности спортсмена, который в конечном счете повлияет на рекомендуемый уровень ЭП (Kerksick et al., 2018).

Таким образом, спортсменам важно сопоставлять энергетические потребности с суточными энергозатратами относительно определенных периодов годового цикла. Значения суточных энергозатрат индивидуальны и зависят от периода обследования, интенсивности и длительности физических нагрузок, а также от метода измерения. Кроме того, исследования переходного периода немногочисленны и, в основном, направлены на изучение влияния физических

нагрузок на компонентный состав тела без оценки ЭП. Поэтому остается открытым вопрос как происходит восстановление спортсменов по средствам питания в переходный период.

1.3 Энергетический баланс, низкая доступность энергии и относительный дефицит энергии в спорте

С целью обеспечения высокой физической работоспособности и результативности в разные периоды годичного цикла в спорте высших достижений перед каждым спортсменом, тренирующим выносливость, стоит задача согласовать (рисунок 2) суточные энерготраты и ЭП для достижения устойчивого ЭБ: $\text{ЭБ} = \text{ЭП (ккал/сут)} - \text{суточные энерготраты (ккал/сут)}$ (O'Connor, Slater, 2011; Burke et al., 2018; Siedler et al., 2023).



Рисунок 2 – Концепция энергетического баланса (авторский рисунок).

Примечание: ЭП – энергопотребление (в ккал/сут), ЭТ – суточные энерготраты (в ккал/сут).

Проанализировав доступную литературу по циклическим видам спорта, была составлена таблица 4, отражающая ЭБ в разные периоды годичного цикла среди спортсменов циклических видов спорта.

Таблица 4 – Энергетический баланс среди спортсменов циклических видов спорта в подготовительный и соревновательный периоды годового цикла по данным литературы (M±SD, авторская таблица)

Исследование	Период	n	Энерготраты		Энергопотребление, ккал/сут	Вид спорта (пол)
			Покой, ккал/сут	Суточные, ккал		
Schulz et al., 1992	П	9	1327±83	3913±556	2459±304	Бег (Ж)
Hassapidou, Manstrantoni, 2001	С	11		2188±239	1679±546	Бег (Ж)
Motonaga et al., 2006	П	6	1581±63	4514±739	3784±91	Бег (М)
Fudge et al., 2006	П	9	1531±53	3492±249	3165±318	Бег (М)
Costa et al., 2014	С	19		13853±2388	5493±2866	Бег, марафон (М)
Herring et al., 1992	П	9	1571±35		2321±111	Бег (Ж)
Hassapidou, Manstrantoni, 2001	П	11		2159±284	1816±549	Бег (Ж)
Costa et al., 2014	С	6		10748±1910	3105±1194	Бег, марафон (Ж)
Hassapidou, Manstrantoni, 2001	П	9		2520±304	2015±542	Плавание (Ж)
Ousley-Pahnke et al., 2001	С	15	1800±87	3065±290	2275±665	Плавание (Ж)
Trappe et al., 1997	С	5	1840±130	5593±495	3136±227	Плавание (Ж)
Hassapidou, Manstrantoni, 2001	С	9		2550±210	1890±709	Плавание (Ж)
Jones, Leitch, 1993	С	53		3556±1025	3895±621	Плавание (М, Ж)
Hill, Davies, 2002	П	7	1389±34	3957±1219	2214±313	Гребля (Ж)
Sjodin et al., 1994	П	4		7213±1003	7213±1099	Лыжные гонки (М)
Papadopoulou et al., 2012	П	23		3095±582	2255±790	Лыжные гонки (М)
Boulay et al., 1994	П	7	1958±382	4060±955	3869±382	Лыжные гонки (М)
Papadopoulou et al., 2012	С	23		2911±508	2125±639	Лыжные гонки (М)
Sjodin et al., 1994	П	4		4371±525	4347±454	Лыжные гонки (Ж)
Papadopoulou et al., 2012	П	10		2580±307	1988±319	Лыжные гонки (Ж)
Papadopoulou et al., 2012	С	10		2466±327	2011±330	Лыжные гонки (Ж)
Bescós et al., 2012	С	8		10246±1624	5446±2126	Веломарафон (М)
Armstrong et al., 2012	С	42	1652±248	4602±538	2648± 837	Велогонки (М)
Hulton et al., 2010	С	4		6420±470	4918±810	Велогонки (М)
Martin et al., 2002	С	8	2259±189	3981±244	3552±724	Велогонки (Ж)

Примечание: П – подготовительный, С – соревновательный, М – мужской пол, Ж – женский пол.

Как показывает ряд работ (Schulz et al., 1992; Herring et al., 1992; Boulay et al., 1994; Hassapidou, Manstrantoni, 2001; Hill, Davies, 2002; Motonaga et al., 2006; Fudge et al., 2006; Papadopoulou et al., 2012) у большинства спортсменов циклических видов спорта выявлен отрицательный ЭБ, как в подготовительный период, так и в соревновательный период (Trappe et al., 1997; Hassapidou, Manstrantoni, 2001; Ousley-Pahnke et al., 2001; Martin et al., 2002; Hulton et al., 2010; Bescós et al., 2012; Armstrong et al., 2012; Papadopoulou et al., 2012; Costa et al., 2014). Причем значение дефицита энергии в подготовительный период составляло в среднем 304 ккал/сут для мужчин и 1145 ккал/сут для женщин, в соревновательный период – 2177 ккал/сут для мужчин и 1252 ккал/сут для женщин. Положительный ЭБ в подготовительный период выявлен только у лыжников-гонщиков мужского пола (Sjodin et al., 1994), в соревновательный – у спортсменов, занимающихся плаванием (Jones, Leitch, 1993).

Наиболее очевидным объяснением отрицательного ЭБ среди спортсменов на протяжении всего годового цикла является классический вопрос о занижении количества потребляемой энергии. Среди спортсменов занижение показателей при самостоятельной оценке ЭП может составлять 10-45% суточных энергозатрат (Magkos, Yannakouli, 2003). Так же причины сниженных показателей ЭП могут заключаться в том, что в подготовительный период спортсмены часто целенаправленно занижают общее потребление калорий для уменьшения массы тела на фоне большого объема тренировочной нагрузки (Heydenreich et al., 2017). Другим объяснением отрицательного ЭБ может служить неточность методов, используемых для оценки ЭП и суточных энергозатрат среди спортсменов. В соревновательный период выявление энергодефицита можно объяснить тем, что суточные энергозатраты изучаются в дни реальных соревнований, где интенсивность физической нагрузки максимальна, а не во время обычных тренировочных дней соревновательного периода, что, вероятно, указывает на переоценку значений суточных энергозатрат (Heydenreich et al., 2017).

Во время подготовительного периода краткосрочный отрицательный ЭБ, ведущий к увеличению использования запасов энергии, в понимании тренеров и

спортсменов, имеет место быть с целью достижения пика формы, но во время соревновательного периода ЭБ необходимо поддерживать на должном уровне (Wasserfurth et al., 2020).

Понимание регуляции ЭБ и связанных с ним метаболических изменений в ответ на физическую нагрузку важно для коррекции тренировочного и восстановительных процессов (Gonzalez et al., 2019). Масса тела остается стабильной при устойчивом ЭБ, однако даже кратковременный дисбаланс энергии в организме может сопровождаться динамическими компенсаторными реакциями, изменяющими массу тела (Hall et al., 2012), причем результирующие увеличение/уменьшение массы тела приходится на 60-80% ЖМТ (Hill et al., 2013). При этом с увеличением уровня физической активности, в частности у высококвалифицированных спортсменов, вариативность массы тела незначительна при нарушении ЭБ (Hankinson et al., 2010). Тем не менее, длительный отрицательный ЭБ во время тренировочного периода часто приводит к ряду последствий, как физических (потеря БМТ, снижение качества сна, гормональные изменения, тахикардия в состоянии покоя), так и психологических (апатия к тренировкам, повышенный стресс) (Loucks, 2004; Burke et al., 2006; Sundgot-Borgen et al., 2013; Frączek et al., 2019), а любое дальнейшее увеличение тренировочной нагрузки может привести к развитию перетренированности и повышенной заболеваемости (Sundgot-Borgen et al., 2013). Поэтому для поддержания устойчивого ЭБ каждому спортсмену необходимо адаптировать рекомендации по питанию (Kerksick et al., 2019; Jagim et al., 2021) в соответствии с требованиями, предъявляемыми к различным периодам годового цикла (Stellingwerff et al., 2007).

В ответ на длительный отрицательный ЭБ (обычно вызванный в спорте снижением калорийности рационов и/или увеличением физической нагрузки) развивается адаптивный термогенез (АТ) – динамичный механизм, который помогает нашему телу регулировать энерготраты в ответ на внешние и внутренние факторы, который, в первую очередь, отражается на массе тела и компонентном составе тела (Muller, Bosy-Westphal, 2013; Soares, Müller, 2018; Nunes et al., 2021). В литературе до сих отсутствует единое четкое определение и методология оценки

АТ (Muller, Bosy-Westphal, 2013; Nunes et al., 2021). Предполагаемые факторы, способствующие развитию АТ, включают изменения в работе СНС, гормональной регуляции и активности метаболических путей (Muller et al., 2016; Egan, Collins, 2022). А в контексте дефицита или избытка ЭП само существование АТ остается спорным (Siedler et al., 2023).

При снижении веса АТ дифференцируют в зависимости от (1) ЭТП и энергозатрат вне ЭТП, (2) фаз снижения массы тела, связанных с мобилизацией гликогена, и (3) поддержания сниженной массы тела, затрагивающей защитные механизмы организма и риски обратного набора веса (Muller et al., 2016). Различают три фазы снижения массы тела (рисунок 3), ориентированные на две регуляторные системы: изменение метаболизма в ответ на отрицательный ЭБ (фаза I) и поддержание веса после снижения массы тела (фаза III).

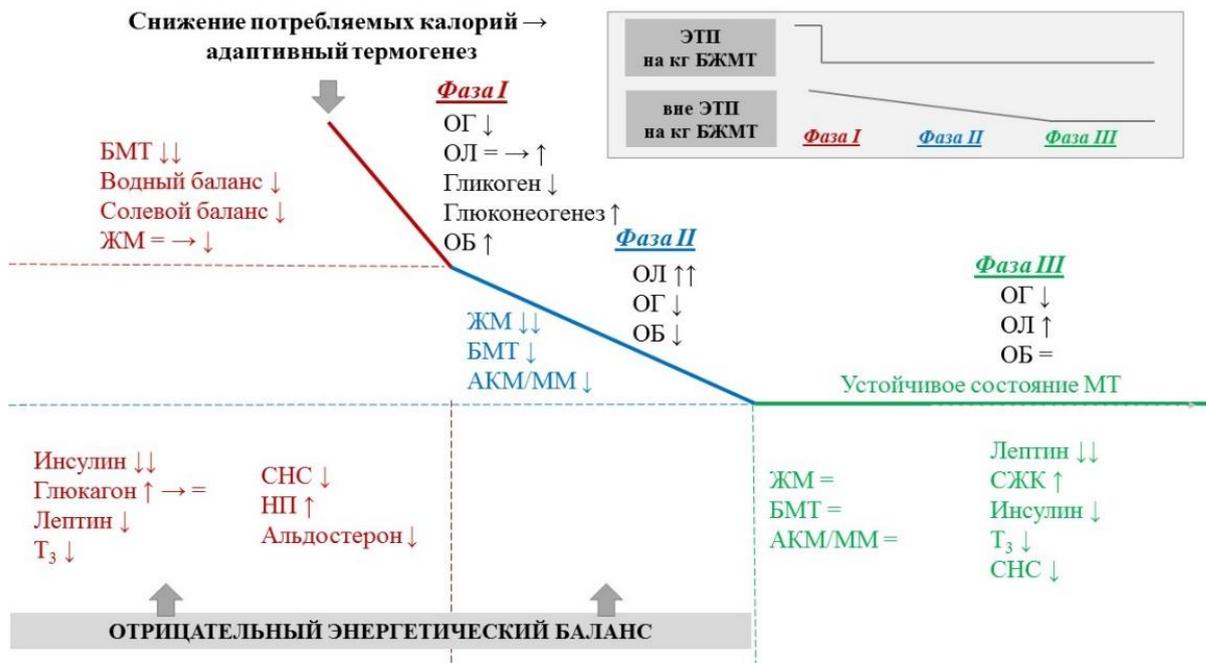


Рисунок 3 – Метаболическая адаптация при потере массы тела в результате отрицательного энергетического баланса (Muller et al., 2016).

Примечание: БМТ – безжировая масса тела, ЖМ – жировая масса, АКМ – активная клеточная масса, ММ – мышечная масса, СЖК – свободные жирные кислоты, T₃ – трийодтиронин, СНС – симпатическая нервная система, НП – натрийуретические пептиды, ОГ – окисление глюкозы, ОЛ – окисление липидов, ОБ – окисление белков.

В промежутке (фаза II) изменения энерготрат пропорциональны изменению массы тела, а дальнейшего АТ не происходит (Muller et al., 2016; Soares, Müller, 2018; Egan, Collins, 2022). В ответ на отрицательный ЭБ углеводная нагрузка на митохондрии снижает и потребность в АТФ удовлетворяется за счет эндогенных источников энергии (гликогена и триглицеридов), поэтому важнейшей характеристикой фазы I является истощение запасов гликогена, а фазы III – потеря жировых отложений (Muller et al., 2016).

В течение первой недели (фаза I) в результате ограничения калорийности рациона АТ рассматривается как срочная адаптация к отрицательному ЭБ. При этом происходит резкое снижение ЭТП и массы тела, затем значение ЭТП поддерживается на относительно постоянном уровне вне зависимости от продолжающегося снижения массы тела. Напротив, адаптация энерготрат вне покоя прямо пропорциональна потере массы тела (Müller, Bosy-Westphal, 2013; Müller et al., 2016; Soares, Müller, 2018). В контексте долгосрочного ограничения потребления энергии АТ может привести в целом к снижению ЭТП на 5-10% от первоначальных значений (Westerterp, 2013), а в ответ на потерю массы тела снижение ЭТП может достигать 40-50% (Doucet et al., 2001; Johannsen et al., 2012; Martins et al., 2020; Martin et al., 2022).

При длительном дефиците калорий развивается фаза II, характеризующаяся потерей ЖМТ, активноклеточной массы и мышечной массы, в ответ на продолжающийся отрицательный ЭБ вплоть до точки, где достигается новое устойчивое состояние. Затем поддержание массы тела (фаза III) обусловлено степенью снижения ЖМТ, низкими уровнями лептина и T_3 , а также низкой активностью СНС. Этот эндокринный паттерн несет в себе риск набора лишнего веса в следствии нарушения питания, а достижение нулевого значения ЭБ не означает, что достигнут здоровый метаболический баланс (Areta et al., 2021). Однако, вопрос о том, сохраняется ли метаболическая адаптация после достижения организмом стабилизации веса (и, следовательно, теоретически нейтрального ЭБ) в их новой заданной точке остается спорным (Siedler et al., 2023).

Показано, что компонентный состав тела спортсменов может влиять на изменения ЭТП при длительной интенсивной физической нагрузке (Woods et al., 2018). Считается, что спортсмены могут достичь определенного порога метаболической адаптации в ответ на относительно меньшие вариации массы тела (Siedler et al., 2023). Кроме того, показано, что доступность Угл (содержание гликогена в печени и мышцах) является ключевым регулирующим фактором ЭБ в период после физической нагрузки (Hopkins et al., 2014; Edinburgh et al., 2019). В связи с этим, спортсмены и физически активные люди, обладающие высокой чувствительностью к инсулину и окислительной способностью скелетных мышц, демонстрируют компенсаторное сокращение ЭП после предыдущего высококалорийного ЭП (Beaulieu et al., 2017). Что проявляется в отсутствии дефицита энергии при физических нагрузках за счет последующего увеличения ЭП. Однако, это вероятно, происходит на фоне многих других физиологических факторов, также способствующих регулированию ЭБ (Gonzalez et al., 2019; Lodge et al., 2023).

В последнее время на смену ЭБ разработана концепция доступности энергии (ДЭ), которая оказалась более информативна в отношении спортсменов, стремящихся скорректировать массу тела и состав тела на фоне интенсивных физических нагрузок (Loucks et al., 2011). Так, ДЭ – это общее количество энергии, доступное для основных физиологических функций после учета энергии, затраченной на тренировочную нагрузку, с разницей между этими значениями, стандартизированных на БМТ спортсмена (Burke et al., 2018; Areta et al., 2021). На сегодняшний день, ДЭ определяется по формуле (1) и выражается в $\text{ккал} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{БМТ}$ (Mountjoy et al., 2018):

$$\text{Доступность энергии} = \frac{\text{Энергопотребление (ккал) – энерготраты при физической нагрузке (ккал)}}{\text{Безжировая масса тела (кг)}} \quad (1)$$

Спортсмены, тренирующие выносливость, стремятся к низкому %ЖМТ в организме и повышенному уровню БМТ (Sundgot-Borgen et al., 2013). Для достижения желаемого результата многие спортсмены придерживаются различных диет, что, в большинстве случаев, сопровождается пищевыми расстройствами и приводит к развитию НДЭ – состояния, при котором остается недостаточно энергии в организме для поддержания оптимальных физиологических функций в конце дня. Спортсмены могут непреднамеренно столкнуться с НДЭ в периоды интенсивных физических нагрузок и/или при недостаточном ЭП (Mountjoy et al., 2018; Burke et al., 2018; Wasserfurth et al., 2020; Sim, Burns, 2021).

В последние годы концепция НДЭ расширилась термином RED-S (Loucks et al., 2011; Mountjoy et al., 2018), который связан с гормональным дисбалансом, нарушениями реструктуризации костей, иммунной системы, функции желудочно-кишечного тракта и сердечно-сосудистой системы (рисунок 4), а так же негативно влияет на самочувствие и физическую работоспособность спортсменов (Mountjoy et al., 2018; Wasserfurth et al., 2020; Desbrow et al., 2020). При этом, НДЭ является этиологическим фактором, лежащим в основе RED-S (Mountjoy et al., 2014).

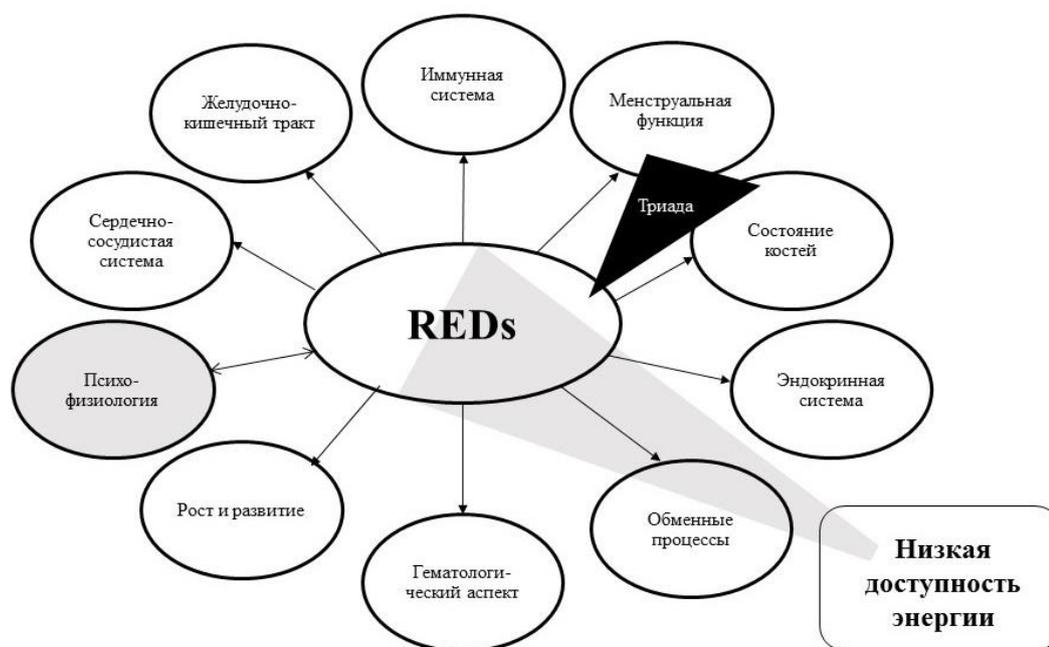


Рисунок 4 – Основные системы организма, подверженные влиянию при относительном дефиците энергии в спорте (RED-S, Mountjoy et al., 2014).

Примечание: триада относится к спортсменам женского пола.

Несмотря на то, что концепция НДЭ активно изучается в настоящее время, многие спортсмены и их тренеры по-прежнему не знакомы с последствиями НДЭ или не знают о RED-S вообще (Brunet et al., 2019). Хотя уже установлено, что к видам спорта с высоким риском развития RED-S относятся те, где ключевые параметры успешности напрямую взаимосвязаны с контролем массы тела и строго определены антропометрическими стандартами, что с высокой долей вероятности обуславливает низкое ЭП и повышенные физические нагрузки (Burke et al., 2018). В большинстве случаев, состояние НДЭ может легко остаться нераспознанным, поскольку нет четких клинических признаков (кроме нарушения менструальной функции у спортсменок), связанных с ним, а также невозможно точно определить нижний порог ДЭ (Jurov et al., 2021). Для женщин было предложено пороговое значение 45 ккал/кг БМТ/сут (Loucks, Thuma, 2003), для мужчин два нижних порога – 15 ккал/кг БМТ/сут (Koebler et al., 2016) и 30 ккал/кг БМТ/сут (Viner et al., 2015).

В 2014 году Международный олимпийский комитет разработал инструмент клинической оценки RED-S для спортсменов и физически активного населения (Mountjoy et al., 2014), в котором в зависимости от анамнеза и результатов физиологического обследования спортсменов классифицируется в одну из трех категорий, определяющих участие в спорте: высокий риск (красный свет), умеренный риск (желтый свет), низкий риск (зеленый свет). Данный инструмент является предпочтительным, но не золотым стандартом, поскольку симптоматика RED-S сложна и включает широкий спектр физиологических (низкий %ЖМТ, снижение минеральной плотности костной ткани, отсутствие менструального цикла, нарушения электрокардиограммы, рецидивирующие заболевания и травмы), психологических (депрессия, тревога, изменения настроения и признаки неупорядоченного питания/расстройств пищевого поведения) и поведенческих характеристик (Mountjoy et al., 2014; Sim, Burns, 2021). Поскольку RED-S оказывает всестороннее влияние на организм спортсменов, крайне важно уметь выявлять факторы риска НДЭ и наличие симптомов, связанных с НДЭ/RED-S на ранней стадии (Logue et al., 2020). Диагностика RED-S – процедура, учитывающая комплекс данных, включающий следующие методы диагностики: самооценку

(опросники и шкалы), лабораторную диагностику (биохимический и гормональный анализ крови), физикальную диагностику (антропометрия, артериальное давление) и аппаратную диагностику (плотность костной ткани, оценка состава тела и обмена веществ).

Эффекты влияния НДЭ (рисунок 5) на организм выражаются в изменении уровня целого ряда важных для метаболизма гормонов и биологических субстанций, в том числе лютеинизирующего гормона, эстрогена, тестостерона, инсулина, кортизола, гормона роста (ГР), инсулиноподобного фактора роста-1 (ИФР-1), гормонов щитовидной железы, грелина, лептина, глюкозы и жирных кислот, что также обуславливает развитие разнообразных патологических состояний в различных системах организма (Areta et al., 2020).

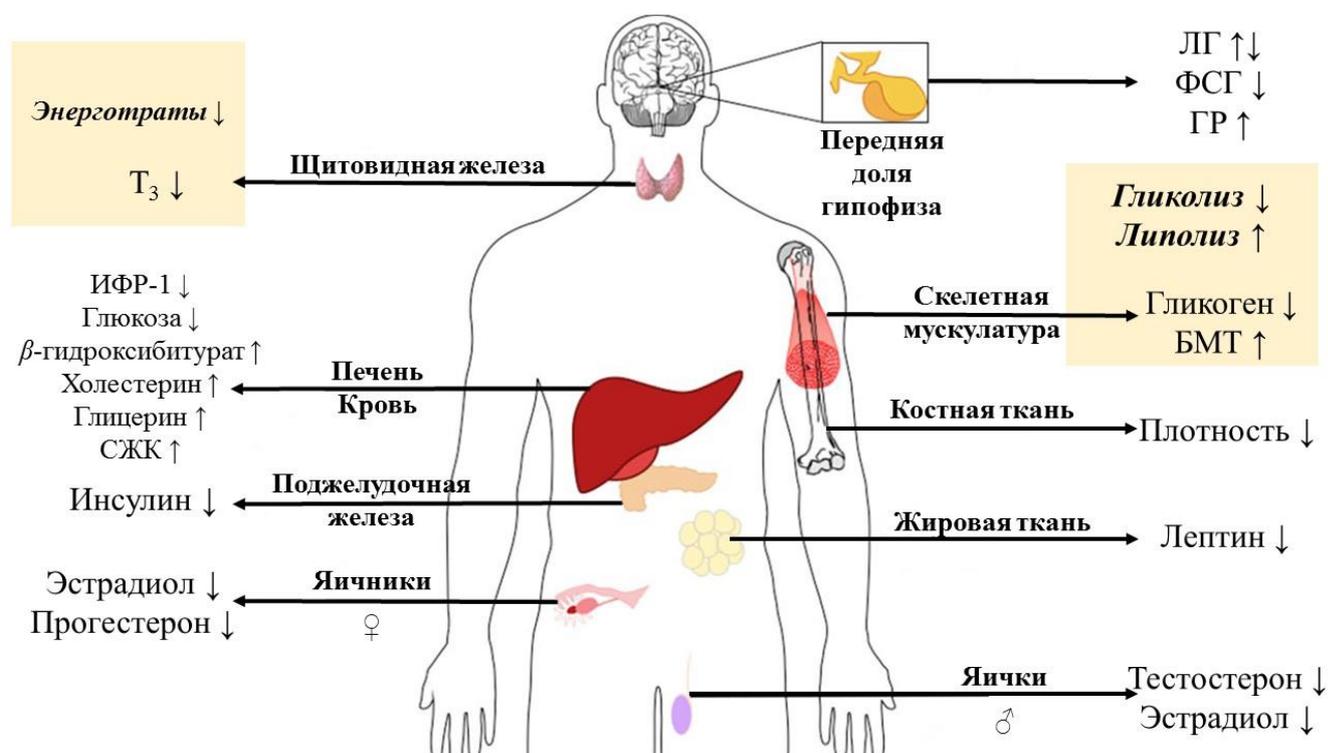


Рисунок 5 – Обзор отдельных эффектов для организма на фоне низкой доступности энергии (создан на основе Areta et al., 2020 и Wasserfurth et al., 2020).

Примечание: T_3 – трийодтиронин, ИФР-1 – инсулиноподобный фактор роста, СЖК – свободно-жирные кислоты, ЛГ – лютеинизирующий гормон, ФСГ – фолликулостимулирующий гормон, ГР – гормон роста, БМТ – безжировая масса тела.

В отношении развития НДЭ зачастую важную (если не определяющую) роль играют факторы, специфичные для конкретного вида спорта, а также психотип спортсменов. В исследованиях сообщают о снижении уровня лептина при значениях ДЭ ≤ 30 ккал/кг БМТ/сут, независимо от того достигается НДЭ за счет дефицита калорий и/или интенсивной физической нагрузкой (Koehler et al., 2016; Voss et al., 2016). Еще одним гормоном, играющим важную роль в патогенезе развития RED-S, является грелин, концентрация которого обратно пропорциональна потере массы тела и ДЭ. Вне зависимости от физической активности уровень T_3 последовательно снижается в ответ на НДЭ, что характерно для женщин в долгосрочной перспективе (Elliott-Sale et al., 2018), однако краткосрочные и долгосрочные последствия НДЭ в оси гипоталамус-гипофиз-щитовидная железа для мужчин неясны (Koehler et al., 2016; Parageorgiou et al., 2017).

Находясь в устойчивом ЭБ, высвобождение ГР гипофизом стимулирует высвобождение ИФР-1 из печени, который уменьшает высвобождение ГР гипофизом по принципу отрицательной обратной связи. Во время голодания печень становится нечувствительной к ГР, что компенсируется повышенным выделением ГР гипофизом при снижении циркулирующего ИФР-1 (Fazeli, Klibanski, 2014). Аналогичным образом, НДЭ последовательно увеличивает циркулирующий ГР с сопутствующим снижением циркулирующего ИФР-1 (Murphy, Koehler, 2020).

В ответ на НДЭ наблюдается снижение уровня глюкозы в крови, повышение уровня свободных жирных кислот, глицерина и β -гидроксибутирата (Loucks, Thuma, 2003; Koehler et al., 2016; Areta et al., 2020). В отличие от положительного кардиопротекторного влияния физической нагрузки, при развитии состояния НДЭ наблюдается, наоборот, повышение уровня общего холестерина, что оказывает неблагоприятное воздействие на сердечно-сосудистую систему (Logue et al., 2018). Снижение утилизации Угл на фоне повышенного окисления жиров при НДЭ у спортсменов необходимо с целью экономии ограниченного запаса гликогена,

лимитирующего высокую работоспособность, что может сопровождаться увеличением процента БМТ (Stellingwerff et al., 2011).

Низкая выработка половых гормонов ассоциирована с быстрой потерей костной массы, а также вызывает у спортсменок-женщин нарушения менструального цикла (сниженный уровень эстрогена) (Nattiv et al., 2007), у мужчин – гипогонадное состояние при физической нагрузке (сниженный уровень тестостерона) (Hooper et al., 2018). НДЭ также сопровождается повышением уровня гормонов стресса, катехоламинов и кортизола, что создает предпосылки для развития более выраженных негативных эффектов на организм спортсменов. В целом, изменение эндокринного профиля, вызванное НДЭ, повышает вероятность возникновения переломов, вызывает перестройку организма, направленную на снижение энергозатрат.

Длительное пребывание в состоянии НДЭ также нарушает мышечную адаптацию, важную как для спортсменов, тренирующих выносливость, так и для силовых видов спорта (Wasserfurth et al., 2020). В некоторых случаях влияние НДЭ на физическую работоспособность может быть замаскировано эффектом снижения массы тела (рисунок 6).

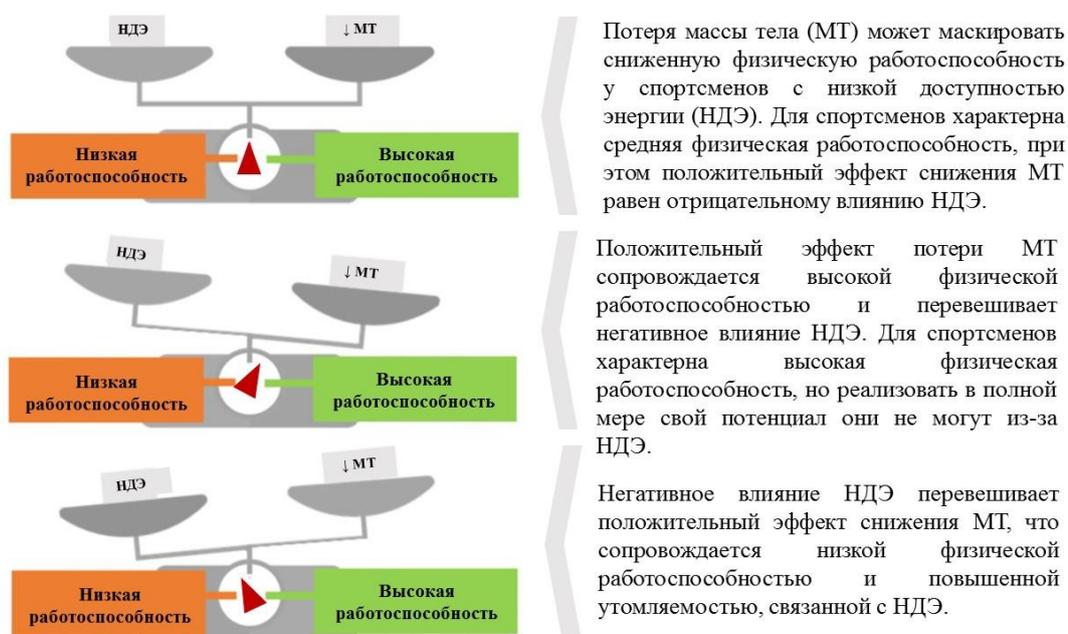


Рисунок 6 – Взаимосвязь между массой тела спортсмена, низкой доступностью энергии и физической работоспособностью (Wasserfurth et al., 2020).

Примечание: НДЭ – низкая доступность энергии, MT – масса тела.

Оценка ДЭ является трудоемкой задачей, поскольку нет стандартизированных методов для определения ЭП, энергозатрат при физической нагрузке и БМТ (Guebels et al., 2014; Burke et al., 2018;). Учитывая, что негативные эффекты НДЭ и RED-S затрагивают большое количество систем и органов, диагностика спортсменов в этом вопросе приобретает еще более сложный характер. Поэтому поиск новых косвенных маркеров для диагностики НДЭ является актуальным вопросом в последнее время (Staal et al., 2018; Sim, Burns, 2021). Установлено, что у спортсменов с НДЭ показатель ЭТП снижен относительно БМТ по сравнению с теми, у кого диагностирована оптимальная ДЭ (Schofield et al., 2019). В связи с этим было высказано предположение, что отношение ЭТП к прогнозируемой ВОО является валидным маркером НДЭ (Logue et al., 2020). Общепринятое значение этого коэффициента ЭТП <0.90 диагностирует НДЭ. Однако показано, что пороговое значение отношения для обнаружения НДЭ варьируется в зависимости от выбранного прогнозирующего уравнения ВОО (Strock et al., 2020). Именно поэтому данный метод лучше всего использовать в сочетании с другими инструментами оценки ДЭ и RED-S (Schofield et al., 2019; Sterringer, Larson-Meyer, 2022; Taguchi, Manore, 2022).

Симптоматика RED-S имеет большое сходство с синдромом перетренированности, в основе которых находятся функциональные изменения в оси гипоталамус-гипофиз. При этом на развитие RED-S и синдрома перетренированности оказывает влияние нарушение питания и НДЭ. Несмотря на схожесть концепций ДЭ и ЭБ из-за связи ЭП с расходом энергии, их направленность принципиально различна. Концепция ЭБ связывает ЭП со всеми компонентами суточных энергозатрат и обычно используется в контексте изменений массы тела и/или компонентного состава тела, вызванных диетой и/или физическими нагрузками. Напротив, концепция ДЭ связывает ЭП только с энергозатратами при физической нагрузке и, таким образом, относится к количеству энергии, доступной для поддержания других физиологических функций вне физической нагрузки (рисунок 7).

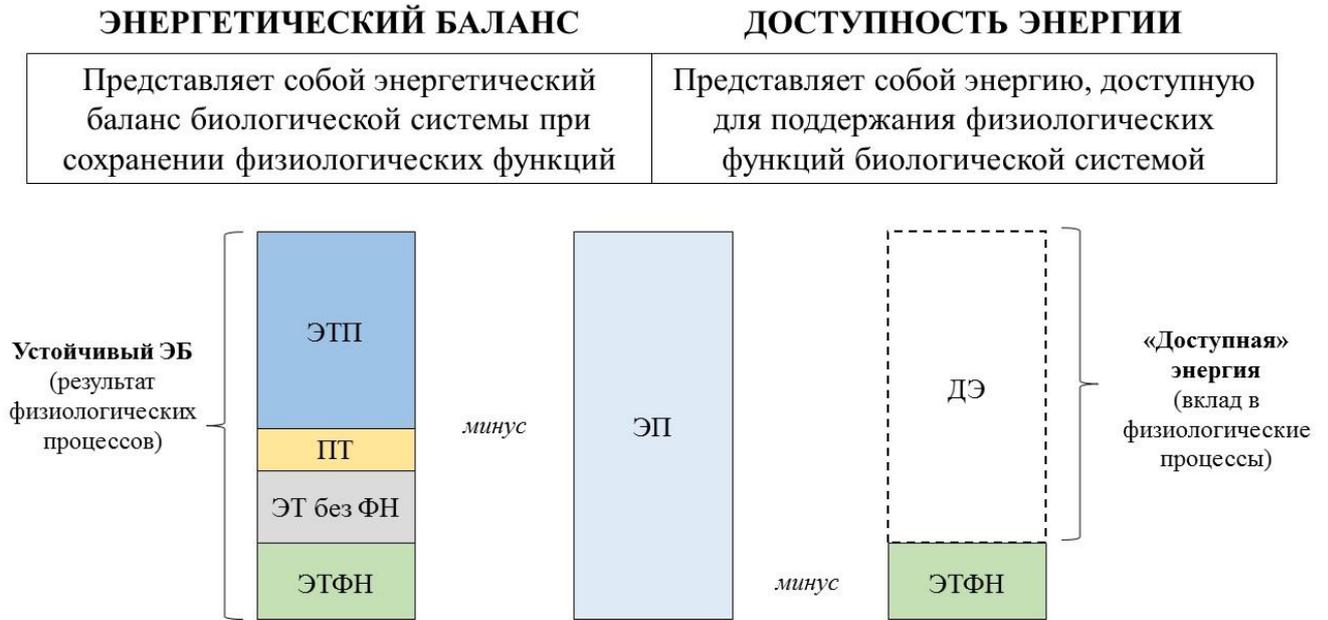


Рисунок 7 – Различия в концепциях энергетического баланса и доступности энергии (Areta et al., 2020).

Примечание: ЭТП – энерготраты покоя, ПТ – пищевой термогенез, ЭТ без ФН – энерготраты без физической нагрузки, ЭТФН – энерготраты при физической нагрузке, ЭП – энергопотребление, ДЭ – доступность энергии, ЭБ – энергетический баланс.

В связи с этим, численное значение ДЭ не зависит от других (динамических) компонентов энерготрат, а следовательно, не подвержено влиянию АТ (Areta et al., 2020; Taguchi, Manore, 2022). Важным ограничением концепции ДЭ является то, что она не учитывает энерготраты без физических нагрузок и термогенез, вызванных холодом, который, как правило, не учитывается в термонейтральных условиях (Levine, 2005). С физиологической точки зрения нет разницы в энерготратах при физической нагрузке и других видах физической активности, определяющихся как любое движение тела, поэтому для установления истинного значения ДЭ необходимо учитывать энерготраты без физической нагрузки, что может быть технически сложно осуществимо. Не смотря на то, что вклад энерготрат без физической нагрузки в суточный расход энергии ниже у

спортсменов в связи высокими энерготратами при физических нагрузках и меньшим количеством времени, доступного для энерготрат без физической нагрузки, не следует игнорировать учет энерготрат без физической нагрузки при расчете ДЭ (Areta et al., 2020).

Таким образом, поддержание оптимального уровня ЭБ способствует сохранению стабильной массы тела и компонентного состава тела. Отрицательный ЭБ в подготовительный период годичного цикла может достигаться за счет высокоинтенсивных физических нагрузках или несоответствующего ЭП относительно суточных энерготрат, что распространённо среди спортсменов циклических видов спорта. Однако в долгосрочной перспективе возникновение отрицательного ЭБ в соревновательный и подготовительный периоды может привести к пагубным последствиям для здоровья спортсменов и отрицательно сказаться на спортивной результативности. При этом, стоит учитывать тот факт, что кульминацией хронического отрицательного ЭБ может стать изменение в доступности энергии.

Несмотря на то, что относительный дефицит энергии в спорте активно изучается, еще остается ряд спорных моментов, таких как детерминация допустимого значения нижнего порога ДЭ, поиск ранних биомаркеров для диагностики дефицита энергии и косвенных предикторов НДЭ, а так же проведение комплексных обследований для установления краткосрочных и долгосрочных влияний НДЭ и RED-S с целью предотвращения проблем со здоровьем и физической работоспособностью не только среди спортсменов, но и физически активного населения.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2.1 Объекты исследования

В качестве объектов исследования были взяты мужчины (таблица 5). Экспериментальная группа – действующие спортсмены циклического вида спорта (n=136) – лыжные гонки, члены сборной команды Республики Коми, часть из которых входит в сборную России. Спортивная квалификация спортсменов – мастера спорта международного класса (4%), мастера спорта (42%), кандидаты в мастера спорта (25%) и перворазрядники (29%). Контрольная группа – практически здоровые студенты второго и третьего курсов ВУЗа ФГБОУ ВО Сыктывкарского государственного университета имени Питирима Сорокина (n=40).

Таблица 5 – Основные антропометрические показатели обследуемых групп

Показатели	Экспериментальная группа (n=136)	Контрольная группа (n=40)
Возраст, лет	21.0±4.9	20.2±2.4
Рост, см	177.3±5.2	177.0±6.5
Масса тела, кг	70.4±5.7	71.0±14.9
Индекс массы тела, кг/м ²	22.4±1.4	22.5±3.8
Жировая масса тела, %	10.3±4.1	18.2±7.0*

Примечание: * – статистически значимые различия между группами $p < 0.001$ (U-критерий Манна-Уитни).

2.2 Организация исследования

Проведенное исследование было осуществлено на базе Отдела экологической и медицинской физиологии ИФ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Протокол исследования (от 28.12.2022) рассмотрен и одобрен локальным комитетом по биоэтике ИФ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Всеми лицами, участвующими в обследовании, были подписаны информированные согласия. Все процедуры

проведены в соответствии с этическими стандартами Хельсинкской декларации (Harriss et al., 2017). Данные собраны в период с 2020 по 2023 год.

Дизайн исследования включал в себя три основных блока (рисунок 8).

Блок I: из контрольной группы были отобраны физически активные юноши ($n=10$), среди которых проведено исследование влияния ПТ стандартизированного углеводного завтрака на ЭТП и компонентный состав тела (май). Блок II: проведен БИА для установления различий в компонентном составе тела между экспериментальной ($n=30$) и контрольной ($n=40$) группами (май, июнь).

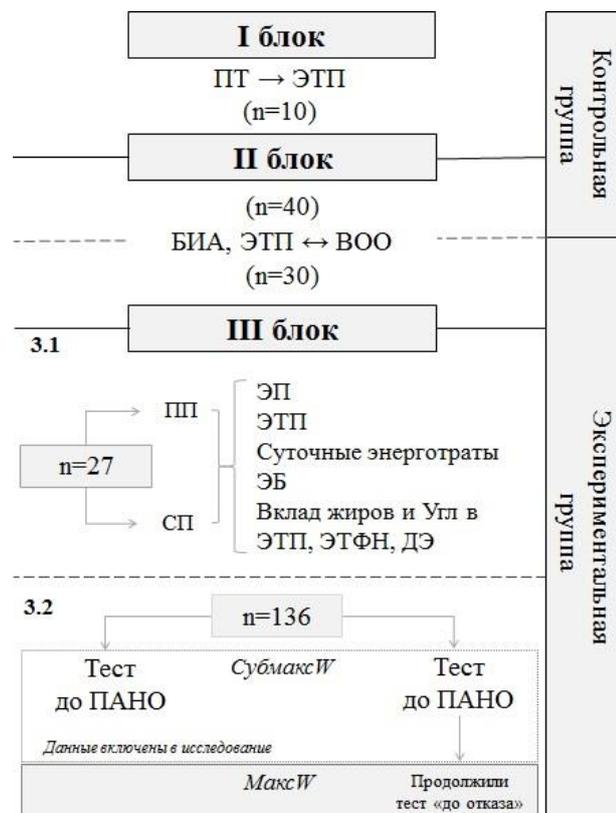


Рисунок 8 – Дизайн исследования.

Примечание: ПТ – пищевой термогенез, ЭТП – энерготраты покоя, БИА – биоимпедансный анализ, ВОО – величина основного обмена, ПП – подготовительный период, СП – соревновательный период, ЭП – энергопотребление, ЭБ – энергетический баланс, Угл – углеводы, ЭТФН – энерготраты при физической нагрузке, ДЭ – доступность энергии, ПАНО – порог анаэробного обмена, субмаксW – субмаксимальная нагрузка, максW – максимальная нагрузка.

В подготовительный период (май, июнь, июль) среди экспериментальной группы ($n=30$) была выявлена разница между ЭТП и ВОО. Из экспериментальной группы взяты только высококвалифицированные (блок II и III, этап 3.1) лыжники-гонщики со спортивной квалификацией мастера спорта международного класса (10%), мастера спорта (30%), кандидаты в мастера спорта (60%).

Блок III был разделен на два этапа:

3.1. Из экспериментальной группы (блок II) были отобраны высококвалифицированные спортсмены, которые проходили тестирование как в подготовительный (июнь-июль), так и в соревновательный (март) периоды годового цикла. У этих лыжников-гонщиков ($n=27$) проведена оценка ЭТП, выявлено соответствие ЭП суточным энерготратам, определены энерготраты при максимальной физической нагрузке, вклад основных энергетических субстратов (жиров и Угл) в структуру энерготрат и ДЭ в оба периода годового цикла.

3.2. Проведен ретроспективный анализ данных подготовительного периода (июнь-сентябрь) среди лыжников-гонщиков ($n=136$). Спортсмены были разделены на две группы по результатам велоэргометрического тестирования: группа I ($n=28$) – спортсмены, которые завершили тест на уровне порога анаэробного обмена (ПАНО), группа II ($n=108$) – спортсмены, которые выполнили тест «до отказа» и перешли уровень ПАНО. Остановка теста в случае группы I была связана с отказом спортсмена от продолжения пробы или с невозможностью удерживать спортсменом скорость педалирования. В данное исследование не были включены спортсмены, которые завершили велоэргометрическое тестирование по иным клиническим (снижение или повышение артериального давления, выраженное тахипноэ или диспноэ, симптомы со стороны центральной нервной системы, такие как нарушение координации движений, головокружение, бледность, тошнота) и электрокардиографическим причинам. Разделение по спортивной квалификации в группах было равнозначным. Для корректного сравнения полученных результатов среди групп в исследование включены данные только при субмаксимальной физической нагрузке.

Все лыжники-гонщики находились под руководством тренера и следовали спортивным режимам тренировок, характерным для их вида спорта. Критериями допуска к исследованию являлись возраст (от 18 до 30 лет), место проживания – г. Сыктывкар, Республика Коми, среди спортсменов специализация лыжные гонки и спортивная квалификация не ниже 1 спортивного разряда. Критериями исключения к исследованию являлись диагностированные острые или хронические заболевания.

2.3 Методы исследования

Антропометрия и биоимпедансометрия. Рост (погрешность ± 1 см) и массу тела (погрешность ± 0.2 кг) определяли с помощью медицинского весоростомера (Россия), измерение ЖМТ и %ЖМТ при помощи прибора ВF302 (Omron, Япония) с погрешностью $\pm 3-8\%$ (рисунок 8, блок III). Антропометрию, включая многочастотный сегментарный анализ компонентного состава тела с оценкой ЖМТ, БМТ, СММ, общего содержания воды организма и АКМ, определяли с помощью анализатора состава тела (погрешность $\pm 1-3\%$) ACCUNIQ BC380 («SelvasHealthcare», Южная Корея) с использованием технологии БИА (рисунок 8, блок I, II).

Статистически значимых различий между антропометрическими значениями, полученными при помощи медицинского весоростомера (Россия), и аналогичными значениями, полученными анализатором ACCUNIQ BC380 («SelvasHealthcare», Южная Корея), а также между показателями ЖМТ (в кг и %), полученными при помощи прибора ВF302 (Omron, Япония) и анализатора ACCUNIQ BC380 («SelvasHealthcare», Южная Корея), выявлено не было.

Исследование проводилось утром, натощак (рисунок 8, блок II) и после тестового завтрака, (рисунок 8, блок I), в положении стоя на платформе анализатора, при этом использовались встроенный ультразвуковой антропометр, четырехполюсная модель с использованием восьми тактильных электродов (по две пары для кистей рук и стоп).

Энерготраты покоя. Исследование ЭТП проводили методом непрямой калориметрии с помощью индивидуальной лицевой маски на эргоспирометрической системе «Oxycan Pro» (Jaeger, Вюрцбург, Германия) с регистрацией потребления кислорода, выделения углекислого газа, дыхательного коэффициента (ДК), а также определением скорости окисления метаболических субстратов (Угл, жиров и белков).

Участникам накануне исследования было рекомендовано ограничить тяжелые физические нагрузки и поздний ужин, а также воздержаться от кофеина. Исследование проводили утром, натощак или после стандартизированной углеводной нагрузки (рисунок 8, блоки I, III), после 8-часового сна, в состоянии полного физического покоя и отсутствия каких-либо внешних раздражителей при комфортной температуре (23-24°C). Обследуемого помещали на кушетку, предварительно закрепив на его лице маску. Затем, участникам давалось время для адаптации (10-15 минут), чтобы успокоиться и освоиться. После нормализации значений ДК (0.8-0.86), проводили измерение в течение 5-10 минут в положении лежа.

Пищевой термогенез. После проведенного натощак измерения ЭТП испытуемым предлагался стандартизированный углеводный завтрак (банан – 1 шт, галеты – 3-5 шт и черный чай без сахара – 200 мл), калорийность которого была 250-300 ккал на порцию. Химический состав тестового завтрака составил (% от калорийности): белки – 8, жиры – 1; Угл – 91. Продолжительность завтрака длилась около 10 минут. По истечении 90 минут после стандартизированного углеводного завтрака проводили повторное измерение ЭТП. Термогенез тестового завтрака рассчитывали, как разницу между постпрандиальным обменом и ЭТП натощак.

Величина основного обмен. Значения ВОО были рассчитаны с использованием прогнозирующего уравнения Харриса-Бенедикта для мужчин (Jagim et al., 2018): $VOO = 66.5 + 13.75 \times \text{масса тела (кг)} + 5.0 \times \text{рост (см)} - 6.78 \times \text{возраст (годы)}$. В серии аппаратов ACCUNIQ расчет ВОО производился по формуле Кетч-МакАрдила (Справочник..., 2017): $VOO = 370 + (21.6 \times \text{БМТ})$.

Велоэргометрическое тестирование. Спортсмены выполнили тест «до отказа» со ступенчато увеличивающейся нагрузкой на велоэргометре (Ergoselect-100, Ergoline GmbH, Германия) в режиме «breath by breath». У спортсменов в покое сидя и во время теста определяли: энерготраты, скорость окисления макронутриентов, частоту сердечных сокращений (ЧСС), потребление кислорода (ПК), Ватт-Пульс ПАНО, мощность нагрузки при ЧСС 170 уд/мин (PWC 170), максимальное потребление кислорода (МПК) и ДК методом непрямой калориметрии с помощью эргоспирометрической системы «Oxycan Pro» (Jaeger, Вюрцбург, Германия). Все параметры усреднялись каждые 15 секунд. Процедура тестирования включала этапы: покой лежа, покой сидя (2 минуты), педалирование без нагрузки (1 минута), затем ступенчато увеличивающаяся нагрузка (начиная со 120 Вт с шагом 40 Вт каждые 2 мин) и восстановление (5 минут). В данной работе не рассматривался этап сидя и восстановления. Скорость вращения педалей поддерживалась на уровне 60 оборотов в минуту. Величину МПК определяли как наибольшее ПК в конце или перед окончанием нагрузки в тесте «до отказа». Переход в анаэробную зону регистрировался по значению ДК выше 1.00-1.02. Данные любезно предоставлены к.б.н., с.н.с. Гарновым И.О. и к.б.н., н.с. Логиновой Т.П.

Вклад макронутриентов в энерготраты. Процентный вклад макронутриентов в ЭТП рассчитывался по уравнению (McGilvery, Goldstein, 1983):

$$\% \text{ Жиров} = ((1 - \text{ДК})/0.29) \times 100;$$

$$\% \text{ Углеводов} = ((\text{ДК} - 0.71)/0.29) \times 100.$$

Расход макронутриентов при субмаксимальной и максимальной физических нагрузках за велоэргометрическое тестирование производился с помощью разработанной нами оригинальной программы «Оценка энерготрат и вклада макронутриентов в физическую работоспособность в тесте «до отказа» на системе Oxycan Pro» (Свидетельство о ГР программы для ЭВМ № 2022613491 от 21.03.2022).

Суточные энерготраты. Расчет суточных энерготрат проводился с учетом КФА по уравнению прогнозирования (Shetty, 2005): суточные энерготраты (ккал)

= КФА × ЭТП. КФА соответствовал рекомендациям ВОЗ для взрослых высококвалифицированных спортсменов, тренирующих выносливость, основанных на объеме и интенсивности физических нагрузок и составил 2.4 и 2.5 в подготовительный и соревновательный периоды соответственно (Shetty, 2005).

Энергопотребление. Большинство лыжников-гонщиков (95%), принимавших участие в данном исследовании, имели централизованное стандартизированное 3-разовое питание на базе Центра спортивной подготовки сборных команд Республики Коми. Каждый спортсмен вел подробный учет трехдневного рациона питания (два будних дня и один выходной) с указанием торговых марок продуктов питания и напитков, способов приготовления, времени употребления, количества порций продуктов и жидкостей, а также категории приема пищи (завтрак, обед, ужин или перекус).

Полученные данные проанализировали с помощью специально разработанной компьютерной программы «Спорт: расчет и анализ рациона» (Свидетельство о ГР программы для ЭВМ № 2014619853 от 23.09.2014) (Физиолого-биохимические механизмы..., 2019). С помощью нее производили расчет пищевой и энергетической ценности индивидуальных рационов питания, а также экспресс-оценку адекватности расчетных величин нормам физиологической потребности организма в основных пищевых веществах и энергии (Kerksick et al., 2018; Jagim et al., 2021; Методические рекомендации..., 2023).

Энергетический баланс. Расчетная величина ЭБ оценивалась по уравнению (Loucks et al., 2011): ЭБ (ккал/сут) = ЭП – суточные энерготраты. Полученные значения интерпретировали следующим образом: если суточные энерготраты превышали ЭП, то ЭБ был отрицательным. Если суточные энерготраты меньше ЭП, то ЭБ был положительный.

Доступность энергии. Расход энергии при физической нагрузке оценивался с помощью пульсометрии. ДЭ оценивали по формуле (Mountjoy et al., 2018): ДЭ = (ЭП, ккал/сут – энерготраты при физической нагрузке, ккал)/БМТ, кг. Затем полученные значения сравнивали с пороговыми для спортсменов-мужчин: НДЭ

(<30 ккал/кг БМТ/сут) и оптимальная ДЭ (>45 ккал/кг БМТ/сут) (Loucks et al., 2011).

Мочевина в крови. Была проведена оценка биохимического статуса спортсменов для исключения отрицательного азотистого баланса. Забор крови осуществляли с 8 до 11 часов утра натощак из локтевой вены в вакуумные пробирки (Greiner Bio-One GmbH, Австрия), содержащие гепарин в качестве антикоагулянта. Концентрацию мочевины определяли методом иммуноферментного анализа с использованием биохимического анализатора «ChemWell 2900» (США). Данные любезно предоставлены к.б.н., в.н.с. Потолицыной Н.Н.

Статистические методы исследования. Статистическую обработку полученных данных осуществляли с помощью пакета прикладных программ Statistica (версия 12.6, StatSoftInc, 2015). Нормальность распределения проверяли критерием Шапиро-Уилка для выборок малого объема ($n < 50$), критерием Колмогорова-Смирнова для выборок большого объема ($n > 50$). Для обеспечения сопоставимости с другими исследованиями, было использовано среднее (M) и стандартное отклонение (SD) для описания выборочной совокупности.

Значимость различий между показателями оценивали с помощью непараметрических критериев Уилкоксона (между двумя зависимыми выборками), U-критерия Манна-Уитни (между двумя независимыми выборками) и критерия согласия Пирсона (χ^2). Для оценки влияния роста на параметры компонентного состава тела был использован ковариационный анализ (ANCOVA). Корреляционный анализ проводили по Спирмену. Различия считали статистически значимыми при $p < 0.05$.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 Пищевой термогенез и энерготраты покоя

Результаты антропометрического обследования контрольной группы (рисунок 8, блок I) представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Антропометрическая характеристика контрольной группы

Показатели	Контрольная группа (n=10)
Возраст, лет	19.9±1.6
Рост, см	177.9±7.5
Масса тела, кг	73.5±17.8
Индекс массы тела, кг/м ²	23.0±4.2
Жировая масса тела, %	17.6±6.9

Величина ПТ стандартизированного углеводного завтрака была 36.0±5.7 ккал, что составило 13% от калорийности углеводной пищевой нагрузки (таблица 7).

Таблица 7 – Энерготраты покоя и компонентный состав тела до и после стандартизированного углеводного завтрака у контрольной группы

Показатели	До тестового завтрака (n=10)	После тестового завтрака (n=10)
Энерготраты покоя, ккал	1851.2±106.0	1887.2±111.7
Общая вода организма, л	43.4±7.2	43.7±7.4*
Белки, кг	11.8±2.1	11.7±2.0
Жировая масса тела, кг	13.8±9.2	14.4±9.6
Безжировая масса тела, кг	58.6±10.3	59.3±10.0

Примечание: * – статистически значимые различия до и после тестового завтрака $p < 0.05$ (критерий Уилкоксона).

У 70% обследуемых наблюдалось увеличение ЭТП после тестового завтрака, однако статистически значимых различий не было обнаружено ($p=0.332$). Сравнительный анализ показателей компонентного состава тела натошак и после приема стандартизированного углеводного завтрака показал увеличение общей воды организма ($p=0.038$).

Проведена оценка скорости окисления основных энергетических субстратов у контрольной группы (рисунок 9) в двух точках до и после тестового завтрака (через 90 минут после приема пищи).

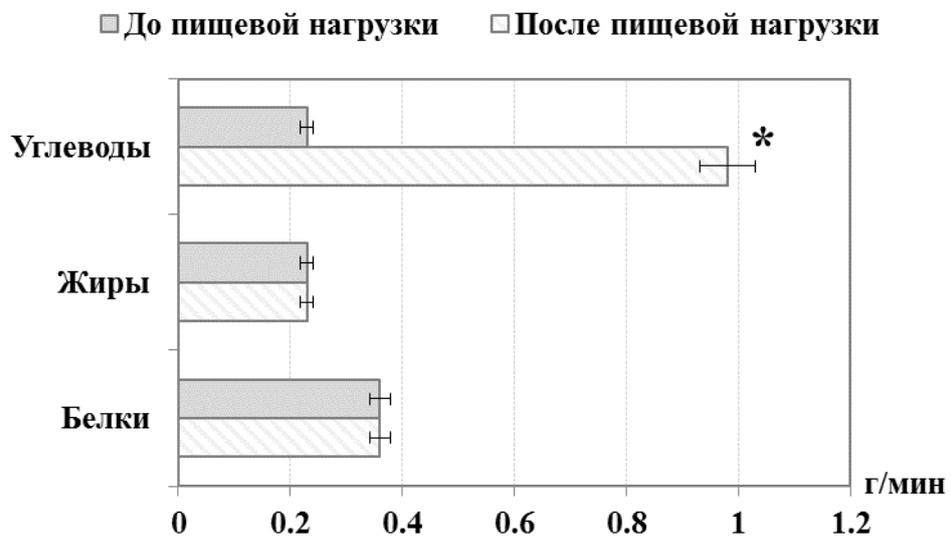


Рисунок 9 – Скорость окисления энергетических субстратов до и после тестового завтрака.

*Примечание: * – статистически значимые различия до и после тестового завтрака $p < 0.05$ (критерий Уилкоксона).*

Скорость окисления жиров (СОЖ) ($p=0.493$) и скорость окисления белков (СОБ) не изменилась ($p=0.227$), а скорость окисления углеводов (СОУгл) статистически значимо увеличилась в 4 раза ($p=0.046$).

3.2 Компонентный состава тела, энерготраты покоя и величина основного обмена у экспериментальной и контрольной групп

По результатам антропометрического обследования (таблица 8) группы (рисунок 8, блок II) значительно отличались между собой только по росту ($p=0.029$).

Таблица 8 – Антропометрическая характеристика обследуемых групп

Показатели	Экспериментальная группа (n=30)	Контрольная группа (n=40)
Возраст, лет	22.3±2.7	20.2±2.4
Рост, см	180.7±6.6	177.0±6.5*
Масса тела, кг	75.4±8.5	71.0±14.9
Индекс массы тела, кг/м ²	23.0±1.9	22.5±3.8

Примечание: * – статистически значимые различия между группами $p < 0.05$ (U-критерий Манна-Уитни).

Проведенный анализ компонентного состава тела на основе БИА выявил статистически значимые различия между группами по количеству общей воды организма, доле общей воды организма в массе тела, %ЖМТ, БМТ, СММ, АКМ и доли активно клеточной массы в массе тела (%АКМ от МТ) (таблица 9).

Таблица 9 – Компонентный состав тела у обследуемых групп

Показатели	Экспериментальная группа (n=30)	Контрольная группа (n=40)
Общая вода организма, л	47.5±4.7	42.0±6.2***
Индекс гидратации организма (соотношение внеклеточной воды к общей воде организма)	0.372±0.004	0.374±0.005
Доля общей воды организма в массе тела, %	63.2±2.7	60.0±5.2**
Жировая масса организма, %	13.7±3.8	18.2±7.0***
Безжировая масса тела, кг	64.9±6.5	57.1±8.5***
Скелетно-мышечная масса, кг	36.2±3.6	32.0±4.8***
Доля скелетно-мышечной массы в безжировой массе тела, %	55.8±0.1	56.1±1.7

Активно-клеточная масса, кг	42.7±4.2	37.6±5.6***
Доля активно-клеточной массы в массе тела, %	56.8±2.5	53.7±4.6**
Доля активно-клеточной массы в безжировой массе тела, %	65.8±0.3	65.9±1.9

Примечание: *** – статистически значимые различия между группами $p < 0.001$, ** – $p < 0.01$ (U-критерий Манна-Уитни).

По доле скелетно-мышечной массы в безжировой массе тела (%СММ от БМТ), доле активно клеточной массы в безжировой массе тела (%АКМ от БМТ) и индексу гидратации организма (соотношения внеклеточной воды к общей воде организма) статистически значимых различий не выявлено между экспериментальной и контрольной группами.

Величина ЭТП была больше на 16% ($p < 0.001$) в экспериментальной группе (2135.0±323.9 ккал/сут) по сравнению с контрольной группой (1839.6±115.4 ккал/сут) (рисунок 10).

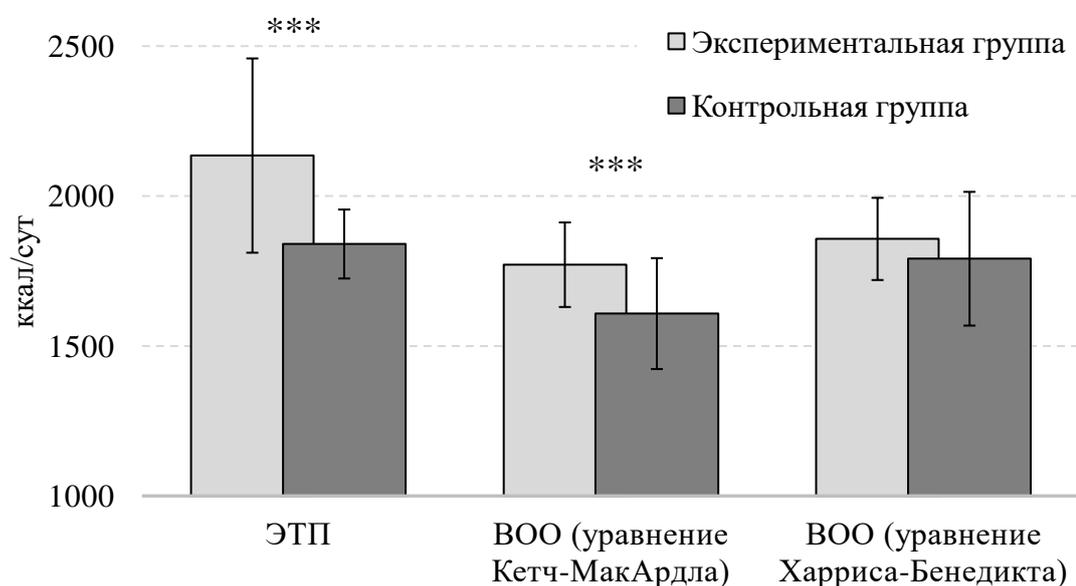


Рисунок 10 – Значения энерготрат покоя и расчетной величины основного обмена у экспериментальной и контрольной групп.

Примечание: *** – статистически значимые различия между группами $p < 0.001$ (U-критерий Манна-Уитни). ЭТП – энерготраты покоя, ВОО – величина основного обмена.

По формуле Кетч-МакАрдла ВОО статистически значимо различалась между группами ($p < 0.001$) и составила 1771.5 ± 141.1 ккал/сут и 1608.0 ± 184.9 ккал/сут соответственно. По уравнению прогнозирования Харриса-Бенедикта ВОО между экспериментальной (1856.7 ± 136.8 ккал/сут) и контрольной (1790.9 ± 223.1 ккал/сут) группами статистически значимых различий не было обнаружено ($p = 0.098$).

Установлено, что уравнение Кетч-МакАрдла занижает получаемые результаты на 16% и 13% относительно ЭТП в экспериментальной ($p < 0.001$) и контрольной ($p < 0.001$) группах соответственно; уравнение Харриса-Бенедикта – на 13% и 4% относительно ЭТП в экспериментальной ($p < 0.001$) и контрольной группах ($p = 0.123$) соответственно.

Несмотря на статистические значимые различия в компонентном составе тела между экспериментальной и контрольной группами (таблица 9), была обнаружена достаточно высокая сходная корреляционная связь $r_s > 0.69$ между показателями БИА и энергообмена в покое, за исключением ЖМТ, коэффициент корреляции для которой был ниже (таблица 10).

Таблица 10 – Зависимость удельных энергозатрат покоя от параметров компонентного состава тела у обследуемых групп

Параметр	Экспериментальная группа (n=30)		Контрольная группа (n=40)	
	rs	p-level	rs	p-level
Энерготраты покоя на кг массы тела				
Безжировая масса тела, кг	0.89	<0.001	0.86	<0.001
Скелетно-мышечная масса, кг	0.72	<0.001	0.57	<0.001
Общая вода организма, л	0.72	<0.001	0.56	<0.001
Активно-клеточная масса, кг	0.52	<0.001	0.69	<0.001
Жировая масса тела, кг	0.41	<0.001	0.39	<0.001

Примечание: rs – коэффициент ранговой корреляции Спирмена.

3.3 Энергетический баланс у экспериментальной группы в разные периоды годового цикла

Антропометрические и физиологические показатели экспериментальной группы (рисунок 8, блок III, этап 3.1) в подготовительный (июнь) и соревновательный (март) периоды годового цикла представлена в таблице 11. Таблица 11 – Антропометрические и физиологические характеристики экспериментальной группы в разные периоды годового цикла

Показатель	Подготовительный период (n=27)	Соревновательный период (n=27)
Возраст, лет	21.1±3.9	21.1±4.0
Рост, см	178.3±5.7	178.4±5.3
Масса тела, кг	73.3±4.3	70.1±4.8
Индекс массы тела, кг/м ²	22.4±1.3	22.0±1.4
Жировая масса тела, %	10.7±3.3	8.9±2.9*
Безжировая масса тела, кг	65.7±9.9	63.7±4.2
Максимальное потребление кислорода на кг массы тела, мл/мин/кг	59.7±6.9	62.2±10.2*

*Примечание: * – статистически значимые различия между подготовительным и соревновательным периодами $p < 0.05$ (критерий Уилкоксона).*

В дни интенсивных физических нагрузок подготовительного периода годового цикла у лыжников-гонщиков выявлено снижение абсолютной энергетической ценности рационов питания в среднем на 10% относительно рекомендуемых норм (Kerksick et al., 2018; Jagim et al., 2021; Методические рекомендации..., 2023). В подготовительный и соревновательный периоды годового цикла обнаружено незначительное снижение потребления Угл (на 5% и 8% соответственно) и белков (на 7% и 10% соответственно) относительно нормативных значений. Доля жиров, напротив, была больше референсных

значений в 1.5 и 2 раза в подготовительный и соревновательный периоды соответственно (таблица 12).

Таблица 12 – Энергопотребление лыжников-гонщиков в разные периоды годового цикла

Период	#	Белки	Жиры	Угл	ЭЦ, ккал/сут
Подготовительный период	г/сут	129.7±33.7	147.0±35.5**	516.6±123.4**	4050.2±796.6*
	г/сут, N	144.3±33.8	100.2±23.5	541.3±126.8	4511±1056
	г/кг/сут	1.9±0.5	2.1±0.5**	4.4±1.7**	54.6±10.6*
	г/кг/сут, N	1.2-1.6	0.5-1.0	6-8	45-50
Соревновательный период	г/сут	150.4±17.5	276.7±51.5**	666.7±122.5**	5986.3±923.7*
	г/сут, N	162.4±38.0	120.3±28.2	721.7±169.0	5413±1268
	г/кг/сут	2.1±0.3	3.8±0.9**	9.2±2.0**	79.2±16.2*
	г/кг/сут, N	1.6-1.8	1.0-1.5	8-10	50-60

Примечание: Угл – углеводы, ЭЦ – энергетическая ценность, # – единицы измерения для белков, жиров и углеводов, N – норма (Kerksick et al., 2018; Jagim et al., 2021; Методические рекомендации..., 2023). ** – $p < 0.001$, * – $p < 0.01$ статистически значимые различия между подготовительным и соревновательным периодами (критерий Уилкоксона).

В подготовительный период обнаружены ожидаемые корреляционные связи между МПК (л/мин) и суммарными энерготратами при физической нагрузке в тесте «до отказа» ($r_s=0.76$; $p<0.001$), МПК (л/мин) и потреблением Угл ($r_s=0.35$; $p=0.009$). Выявлена прямая корреляционная связь между временем выполнения теста «до

отказа» и потреблением жиров ($r_s=0.32$; $p=0.022$), Угл ($r_s=0.30$; $p=0.024$) и белков ($r_s=0.32$; $p=0.019$).

В подготовительный период ЭТП составили 2111.2 ± 294.3 ккал/сут, в соревновательный период – 1891.6 ± 504.9 ккал/сут ($p=0.065$). В перерасчете на массу тела ЭТП в подготовительный период были 30.4 ± 5.6 ккал/сут/кг, в соревновательный период – 27.0 ± 6.8 ккал/сут/кг ($p=0.035$). Была обнаружена прямая корреляционная связь между ЭТП (ккал/сут) и %ЖМТ ($r_s=0.60$; $p<0.001$) и БМТ ($r_s=0.51$; $p<0.01$) в соревновательный период годового цикла. Суточные энергозатраты в подготовительный период составили 5067.6 ± 706.0 ккал, что было статистически значимо выше ($p<0.001$), чем в соревновательный период – 4537.9 ± 1209.1 ккал.

В типичные тренировочные дни подготовительного периода суточное ЭП лыжников-гонщиков не соответствовало суточному расходу энергии. Расчетный относительный дефицит энергии составил около 1017 ккал (25.8 ккал/кг/сут), чего не наблюдалось в соревновательный период годового цикла. Мочевина в венозной крови составляла 6.9 ммоль/л (с лимитами $3.9-12.6$ ммоль/л) в подготовительный период и 4.8 ммоль/л (с лимитами $2.8-6.7$ ммоль/л) в соревновательный период, что находилось в пределах контрольных значений мочевины ($1.7-8.3$ ммоль/л).

В подготовительный период ДЭ составила 14.8 ± 9.3 ккал/кг БМТ/сут, что соответствует НДЭ среди лыжников-гонщиков. Выявлено, что НДЭ была связана с недостаточным потреблением Угл ($r_s=0.75$, $p<0.05$) и снижением общей энергетической ценности рационов питания ($r_s=0.58$, $p<0.05$) в подготовительный период годового цикла. В соревновательный период ДЭ была 64.4 ± 4.5 ккал/кг БМТ/сут, что соответствует оптимальной ДЭ у спортсменов.

Соотношение жиров и Угл в структуре рациона в подготовительный период составляло 39% к 61%, а в соревновательный период – 48% к 52% ($p<0.001$). Доля жиров и Угл в ЭТП в подготовительный период составила 53% и 47%, а в соревновательный период – 55% и 45% ($p=0.634$) соответственно. Вклад в энергозатраты при максимальной физической нагрузке жиров и Угл составило 31%

и 69% в подготовительный период, 35% и 65% ($p < 0.001$) в соревновательный период. При переходе от подготовительного к соревновательному периоду прослеживалось увеличение процентного вклада жиров в ЭП и энерготраты при максимальной физической нагрузке у лыжников-гонщиков (рисунок 11).

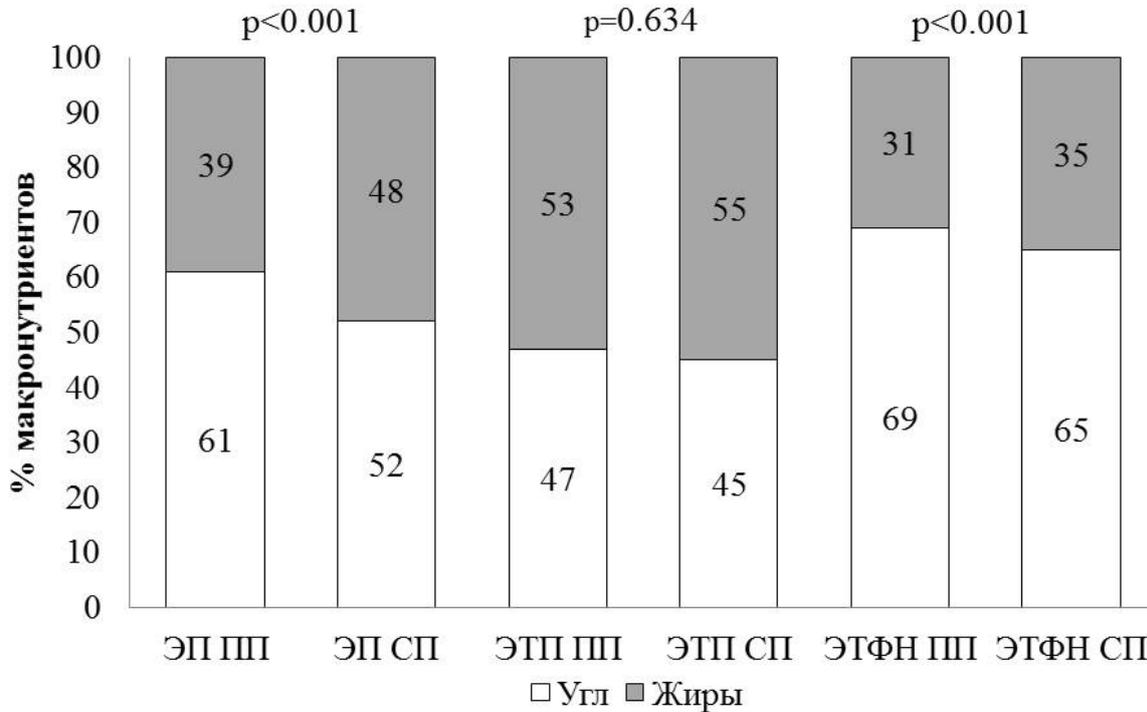


Рисунок 11 – Относительный вклад углеводов и жиров в энергопотребление и энерготраты максимальной физической нагрузки у лыжников-гонщиков в разные периоды годового цикла.

Примечание: p – установлены статистически значимые различия между ПП и СП (критерий χ^2). ПП – подготовительный период, СП – соревновательный период, ЭП – энергопотребление, ЭТП – энерготраты покоя, ЭТФН – энерготраты при физической нагрузке, Угл – углеводы.

3.4 Энерготраты в покое и при субмаксимальной физической нагрузке у экспериментальной группы

По способности преодолеть ПАНО лыжники-гонщики были разделены на две группы (рисунок 8, блок III, этап 3.2): I ($n=28$) – спортсмены, которые завершили тест на ПАНО, II ($n=108$) – спортсмены, которые выполнили тест «до

отказа» и перешли ПАНО. Среди лыжников гонщиков выявлены статистические значимые различия между группами по %ЖМТ, МПК (мл/мин/кг) и максимальной ЧСС (таблица 13).

Таблица 13 – Антропометрические и физиологические характеристики обследуемых спортсменов

Показатель	Группа I (n=28)	Группа II (n=108)
Возраст, лет	21.4±5.4	20.9±4.7
Рост, см	177.6±4.6	177.2±5.4
Масса тела, кг	71.1±5.3	70.2±5.8
Индекс массы тела, кг/м ²	22.5±1.2	22.3±1.5
Жировая масса тела, %	12.0±3.9	9.9±4.0*
Максимально потребление кислорода, л/мин	4.1±0.5	4.3±0.5
Максимально потребление кислорода на кг массы тела, мл/мин/кг	57.9±6.7	61.2±5.9*
PWC 170, Вт	284.1±42.2	283.8±46.7
Максимальная частота сердечных сокращений, уд/мин	173.1±17.0	183.1±10.2*

Примечание: * – статистически значимые различия между группами $p < 0.05$ (U-критерий Манна-Уитни). PWC 170 – мощность нагрузки при частоте сердечных сокращений 170 уд/мин. Группа I – спортсмены, которые завершили тест на ПАНО, группа II – спортсмены, которые выполнили тест «до отказа», перешли ПАНО.

Показатель ЭТП в двух группах статистически значимо не отличался ($p=0.481$) при значимом различии ДК ($p<0.001$). В I группе ЭТП составили 2058.5 ± 220.5 ккал/сут (ДК=0.80), в II группе были 2023.1 ± 216.4 ккал/сут (ДК=0.86). В структуре ЭТП обнаружено значимое уменьшение доли жиров 69% против 48% ($p=0.021$) и увеличение доли Угл 31% против 52% ($p<0.001$) при сравнении групп. В структуре энерготрат при субмаксимальной физической нагрузке отмечено достоверное увеличение доли жиров, 39% против 47% ($p<0.05$) и снижение доли Угл 61% против 53% ($p<0.001$) при сравнении групп (рисунок 12).

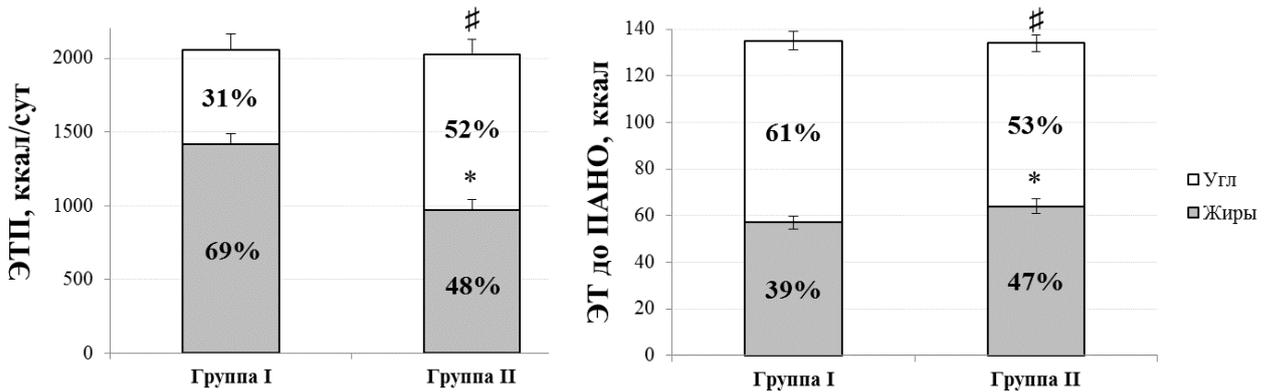


Рисунок 12 – Относительный вклад основных энергетических субстратов в энерготраты покоя и энерготраты субмаксимальной физической нагрузки среди обследуемых групп спортсменов.

Примечание: * – статистически значимые различия между группами $p < 0.05$ по жирам, # – $p < 0.001$ по углеводам (критерий χ^2). ЭТП – энерготраты покоя, ЭТ до ПАНО – энерготраты в тесте до порога анаэробного обмена, Угл – углеводы.

Группа I – спортсмены, которые завершили тест на ПАНО, группа II – спортсмены, которые выполнили тест «до отказа», перешли ПАНО.

При субмаксимальной физической нагрузке по сравнению с фоновыми показателями макронутриентов в I группе идет переключение субстратного энергообеспечения с жирового на Угл. Напротив, в II группе в энергообеспечение субмаксимальной физической нагрузке дополнительно включаются жиры на фоне активного использования Угл.

У двух групп фоновое ПК значимо не отличалось ($p=0.754$) и составило в I группе – 0.44 ± 0.0 л/мин, в II группе – 0.47 ± 0.3 л/мин. Выявлены корреляционные связи между фоновым ПК и ЭТП, а также $CO_{Угл}$ и $CO_{Ж}$ в состоянии покоя (таблица 14).

Величина PWC_{170} составила 287.1 ± 42.2 Вт и 287.80 ± 46.7 Вт для I и II групп соответственно ($p=0.946$). Значение ПК ПАНО ($p < 0.001$) для I группы было 4.0 ± 0.5 л/мин, для II группы 3.4 ± 0.6 л/мин. Не было обнаружено значимых отличий в абсолютных значениях МПК ($p=0.094$), которые составили 4.1 ± 0.5 л/мин и 4.3 ± 0.5 л/мин для I и II групп соответственно. Относительные значения МПК в I группе

(57.9 ± 6.7 мл/мин/кг) и II группе (61.2 ± 5.9 мл/мин/кг) достоверно отличались ($p < 0.05$).

Таблица 14 – Корреляционные взаимосвязи между фоновым потреблением кислорода и энерготратами покоя

Показатель	Группа I (n=28)		Группа II (n=108)	
	Фоновое потребление кислорода			
	rs	p-level	rs	p-level
Измеренные энерготраты покоя, ккал/сут	0.45	0.015	0.44	<0.001
Скорость окисления жиров, г/мин	0.40	0.037	0.24	<0.001
Скорость окисления углеводов, г/мин	-0.24	0.010	0.25	0.008

Примечание: rs – коэффициент корреляции Спирмена. Группа I – спортсмены, которые завершили тест на ПАНО, группа II – спортсмены, которые выполнили тест «до отказа», перешли ПАНО.

Для корректного сравнения энерготрат во время тестирования в II группе также проведен анализ энерготрат при субмаксимальной физической нагрузке (таблица 15), который не показал значимых отличий между группами ($p = 0.399$), при этом расход основных макронутриентов за тест статистически значимо различался.

Таблица 15 – Энерготраты обследуемых лыжников-при выполнении субмаксимальной физической нагрузки

Показатель	Группа I (n=28)	Группа II (n=108)
Энерготраты до ПАНО, ккал	135.9 ± 31.2	134.0 ± 23.4
Жиры, г	6.3 ± 2.0	$7.1 \pm 1.7^*$
Углеводы, г	20.7 ± 4.4	$15.8 \pm 5.9^{**}$

*Примечание: * – установлены статистически значимые различия между группами $p < 0.05$, ** – $p < 0.001$ (U-критерий Манна-Уитни). ПАНО – порог анаэробного обмена. Группа I – спортсмены, которые завершили тест на ПАНО, группа II – спортсмены, которые выполнили тест «до отказа», перешли ПАНО.*

Проведенный корреляционный анализ (таблица 16) выявил значимые связи между энерготратами за тест и МПК, ПК ПАНО, Ватт-Пульс ПАНО и PWC 170 у обеих групп обследуемых.

Таблица 16 – Корреляционные взаимосвязи между энерготратами за тест и функциональными показателями физической работоспособности у лыжников-гонщиков

Показатель	Группа I (n=28)		Группа II (n=112)	
	Энерготраты за тест, ккал			
	rs	p	rs	p
Максимальное потребление кислорода, л/мин	0.91	<0.001	0.86	<0.001
Максимальное потребление кислорода на кг массы тела, мл/мин/кг	0.60	0.002	0.60	<0.001
Потребление кислорода на ПАНО, л/мин	0.91	<0.001	0.44	<0.001
Ватт-Пульс ПАНО, Вт/уд/мин	0.56	0.004	0.50	<0.001
PWC 170, Вт	0.55	0.005	0.70	<0.001

Примечание: rs – коэффициент корреляции Спирмена. ПАНО – порог анаэробного обмена, PWC 170 – мощность нагрузки при частоте сердечных сокращений 170 уд/мин. Группа I – спортсмены, которые завершили тест на ПАНО, группа II – спортсмены, которые выполнили тест «до отказа», перешли ПАНО.

ГЛАВА 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1 Пищевой термогенез и энерготраты покоя

При однодневном обследовании спортсменов в тесте «до отказа» на велоэргометрической системе, мы придерживаемся протокола (от 01.11.2013), который не предусматривает перерыв между измерением ЭТП и энерготрат при физической нагрузке (процедуры происходят последовательно). Поэтому перед тестированием на эргоспирометрической системе «Oxycan Pro» (Jaeger, Вюрцбург, Германия) каждый обследуемый принимает стандартизированный углеводный завтрак. В связи с этим, возник вопрос, как данная пищевая нагрузка влияет на ЭТП. Проведенное обследование физически активной части контрольной группы (таблица 5) показало, что величина ЭТП увеличились после тестового завтрака (таблица 6), тем не менее статистически значимых различий не было обнаружено ($p=0.332$).

Установлено (Blasco Redondo, 2015; Calcagno et al., 2019; Morris, Mohiuddin, 2022), что после приема пищи интенсивность обмена веществ и энергетические затраты организма увеличиваются по сравнению с ВОО в строгой зависимости от химического состава потребляемой пищи. Ранее было показано (Binns et al., 2015), что пищевая нагрузка, содержащая от 200 до 1000 ккал, приводит к увеличению ЭТП примерно на 10% по сравнению с ВОО в результате ПТ через 1 час после приема пищи. В другом исследовании (Calcagno et al., 2019) сравнение ЭП разной калорийности 450 ккал, 1000 ккал и 1500 ккал показало увеличение ЭТ на 9%, 21% и 33% от исходного уровня соответственно, что согласуется с результатами нашего исследования.

В аналогичных работах (Martin et al., 2000; Quatela et al., 2016) сравнили низкокалорийное высокожировое ЭП (195 ккал) с высококалорийным низкожировым ЭП (700 ккал) и обнаружили, что более высокие значения ПТ наблюдались при высококалорийном ЭП. При сравнении ЭП с одинаковой

калорийностью, но с высокой долей углеводов и жиров было выявлено, что ПТ на 96% выше для высокоуглеводного (Bowden, McMurray, 2000) и на 16% больше для высокожирового (Thyfault et al., 2004) ЭП по сравнению с исходным уровнем. Сходное исследование, проведенное среди здоровых молодых мужчин, также показало, что ПТ на 32% выше при ЭП с высоким содержанием Угл по сравнению с высоким содержанием жиров (Nagai et al., 2005). Таким образом, считается, что углеводный компонент питания вносит более существенный вклад в ПТ по сравнению с жировым.

Исследования (Binns et al., 2015) показали, что влияние приема углеводов во время аэробных физических нагрузок умеренной интенсивности незначительно или отсутствует, независимо от возраста и компонентного состава тела. Опираясь на эти данные (Binns et al., 2015), мы проводили обследование спортсменов не натощак, но при условии, что потребление углеводов перед обследованием составляло от 5% до 10% от их суточного рациона. Эффективность такого подхода была подтверждена результатами, полученными на физически активных юношах контрольной группы в рамках данного исследования.

Одним из важных предикторов ЭТП являются параметры компонентного состава тела, полученные на основе БИА (Marra et al., 2021), поэтому был проведен сравнительный анализ показателей компонентного состава тела до и после тестового завтрака (таблица 6).

Базальный уровень метаболизма является конституциональным признаком, который отражает интенсивность энергетического обмена. Среди наиболее значимых детерминант ВОО выделяют такие параметры организма как масса и длина тела, возраст и пол, охватывающих около 70% вариабельности суточных энергозатрат. У спортсменов или физически активных людей ЭТП варьируют в зависимости от компонентного состава тела, особенно БМТ (Levine, 2005; Binns et al., 2015). В подтверждении этого нами была обнаружена прямая корреляционная связь между ЭТП и БМТ ($r_s=0.927$; $p<0.001$), количеством общей воды в организме ($r_s=0.887$; $p<0.001$) и ЖМТ ($r_s=0.748$; $p=0.013$) после тестового завтрака. В то же

время, до пищевой нагрузки между этими показателями не было установлено корреляционных связей.

Величина ПТ зависит от её химического состава (Westerterp-Plantenga et al., 2009; Ruddick-Collins et al., 2022). Белки (Westerterp-Plantenga et al., 2009) обладают наибольшим термическим эффектом (20-30%), в то время как углеводы имеют меньший ПТ (5-10%), а жиры (Ruddick-Collins et al., 2022) – наименьший (0-3%). С целью минимизации влияния вариабельности ПТ на результаты исследования, в качестве стандартизированного завтрака применялась высокоуглеводная пищевая нагрузка. При измерении ЭТП в натощаковом состоянии в энергообмен в основном включены жиры ($p=0.006$), а после пищевой нагрузки, содержащей 91% Угл, 8% белков и 1% жиров от калорийности стандартизированного завтрака, происходит сдвиг в сторону окисления Угл (рисунок 9). При этом известно, что пиковое значение ПТ приходится на временную точку 60 минут после приема пищи (Binns et al., 2015). Поэтому повторная оценка ЭТП после тестового завтрака была произведена именно в этот промежуток времени.

Таким образом, данное исследование подтверждает тот факт, что ЭТП, оцененные после низкокалорийной (до 300 ккал) пищевой нагрузки с высоким содержанием Угл (91%), статистически значимо не отличаются от ВОО. В связи с этим можно заключить, что измерение ЭТП после низкокалорийной углеводной нагрузки у спортсменов правомерно использовать в дальнейших исследованиях.

4.2 Компонентный состава тела, энерготраты покоя и величина основного обмена у экспериментальной и контрольной групп

В спорте существуют требования к физическим качествам спортсменов и показателям компонентного состава тела, исходящих из специфики спортивной деятельности, и лыжные гонки не являются исключением. Применение метода БИА в области спортивной физиологии позволяет дать оценку функциональному состоянию спортсменов и отслеживать изменения компонентного состава тела в динамике годичного цикла.

Сравнительный анализ компонентного состава тела лыжников-гонщиков со студентами юношами сходной возрастной группы и весовой категории выявил отличия в показателях общей воды организма, %ЖМТ, БМТ, СММ, АКМ и %АКМ от массы тела (таблица 9). По количеству %СММ от БМТ и %АКМ от БМТ различий выявлено не было. Так же не было выявлено различий по значениям коэффициента $V_{\text{векВ}}/O_{\text{ВО}}$, с помощью которого оценивают статус гидратации. Все параметры компонентного состава тела у спортсменов были статистически значимо выше, чем у лиц из контрольной группы, за исключением %ЖМТ, что можно объяснить спецификой спортивной деятельности лыжников-гонщиков.

Высокое значение показателя общей воды организма у лыжников-гонщиков относительно группы сравнения было ожидаемым результатом, которое соответствует данным литературы (Николаев, 2012; Melchiorri et al., 2018), поскольку у лыжников-гонщиков повышено значение СММ, относящееся к сильногидратированной ткани (Николаев, 2012). Следует учитывать и тот факт, что повышенное значение СММ и, соответственно, повышенное содержание внутриклеточной воды у спортсменов подразумевают, что значения индекса уровня гидратации организма будут выше, чем общепопуляционные. В нашем исследовании не было обнаружено достоверного различия между группами по индексу гидратации ($p=0.269$). Мы можем предположить, что это может быть связано с тем, что большая часть обследуемых из группы сравнения на момент проведения обследования вела физически активный образ жизни (таблица 8).

Общее количество СММ и ее соотношение с ЖМТ являются важными факторами, определяющими физическую работоспособность элитных лыжников-гонщиков (Carlsson et al., 2014). К примеру, при оптимальной подготовке к соревнованиям для мужчин характерен монотонный рост %СММ от БМТ до 54-56% с одновременным снижением %ЖМТ до 7-9% (Николаев, 2012). Поэтому оценка СММ используется в спортивной медицине наряду с антропометрическими параметрами для характеристики физического развития и уровня тренированности, а также служит мерой адаптационного резерва организма, которая зависит от уровня физической подготовки и питания (Yamada et al., 2012). У спортсменов-

мужчин нормативные значения %СММ от БМТ находится в пределах 54-58% (Николаев, 2012), что согласуется с результатами нашего обследования.

Величина АКМ представляет собой количественное содержание внутренних органов, костной, мышечной ткани, нервных клеток в организме, которое в %АКМ от БМТ используется в спортивной медицине как параметр, который характеризует уровень физической работоспособности спортсменов (Melchiorri et al., 2018). В клинической практике %АКМ от БМТ применяется для оценки достаточности белкового компонента питания и выраженности гиподинамии (Николаев, 2012; Campa et al., 2021).

Показатель %АКМ от БМТ в норме у здоровых нетренированных лиц составляет 53-59% (Руднев и др., 2014), при этом в группе сравнения значение %АКМ от БМТ было выше референсных значений и составило 65.9%, что говорит о хорошей физической подготовленности, достаточности белкового питания и отсутствии гиподинамии у представителей группы сравнения. Для высококвалифицированных спортсменов циклических видов спорта %АКМ от БМТ, как правило, превышает 61-63 % (Николаев, 2012), однако у обследованных лыжников-гонщиков данная величина была выше и составила 65.8%, что может свидетельствовать об отсутствии белковой недостаточности в питании и хорошем уровне спортивной подготовленности у лыжников-гонщиков. Следует отметить тот факт, что при сравнении абсолютных значений АКМ, СММ и ЖМТ между двумя группами выявлены достоверные различия – у лыжников-гонщиков закономерно большие показатели АКМ и СММ и меньшие – ЖМТ. При сравнении относительных значений АКМ (%АКМ от БМТ) и СММ (%СММ от БМТ) не было выявлено достоверных отличий между группами ($p=0.078$), что говорит о хорошем уровне физического развития представителей группы сравнения, а также хорошем уровне спортивной подготовленности у лыжников-гонщиков.

Доказано (Морфологические критерии..., 2010; Carlsson et al., 2014), что уменьшение %ЖМТ среди спортсменов до нижней границы нормы служит показателем высокого уровня подготовленности, напряженности регуляции энергообеспечения и нормального восстановления вследствие увеличения уровня

потребления кислорода на килограмм массы тела (Ettema et al., 2011). Критическое уменьшение жировых отложений ниже 4% может повлиять на способность организма к восстановлению и отрицательно сказаться на иммунной системе (Larsson, Henriksson-Larsén, 2008), а %ЖМТ в организме более 13% может приводить к ухудшению спортивных результатов (Grzebisz, 2020). У обследованных нами лыжников-гонщиков в подготовительный период годового цикла (таблица 9) %ЖМТ был выше 10%, чем в работе (Udebake et al., 2019) и совпал со лимитами 14-15% в аналогичных исследованиях (Grzebisz, 2020). Референсные значения %ЖМТ для высококвалифицированных лыжников-гонщиков варьируются в пределах от 7% до 12% (Jeukendrup, Gleeson, 2019), при этом оптимальное содержание жира в организме мужчин в дисциплинах, тренирующих выносливость, в период соревнований может составлять 8-10% (Ettema et al., 2011), что согласуется с результатами нашего исследования.

Показатель ВОО – это расход калорий в состоянии покоя, необходимый организму для обеспечения нормальной жизнедеятельности, измеренный в натощаковом состоянии. Обычно ВОО определяются с помощью прогнозирующих уравнений, которые удобны в использовании и не требуют сложной аппаратуры, однако расчетный способ менее информативен и имеет большую погрешность, по сравнению с непрямой калориметрией (Jagim et al., 2018; Purcell et al., 2020), которая считается «золотым стандартом» для определения расхода энергии и может использоваться для надежной оценки ЭТП и энерготрат при физической нагрузке (Jagim et al., 2018; Peñailillo et al., 2014; Andersson Hall, 2016; Purcell et al., 2020; MacKenzie-Shalders et al., 2020). Именно поэтому нами было принято решение сравнить ЭТП, полученные методом непрямой калориметрии, и ВОО на основе уравнений прогнозирования.

Как известно (Blasco Redondo, 2015; MacKenzie-Shalders et al., 2020; Wasserfurth et al., 2020), ВОО отличается от ЭТП менее чем на 10%. При этом допускается проводить измерение ЭТП после стандартного завтрака, не натощак (Blasco Redondo, 2015). Оба термина (ЭТП и ВОО) используются в равной степени. В настоящее время в зарубежной литературе наиболее часто обсуждается термин

«resting energy expenditure» или ЭТП (Blasco Redondo, 2015; Silva et al., 2017; Wasserfurth et al., 2020).

В данном обследовании ВОО по уравнению Кетч-МакАрдла была ниже на 16% и 13% относительно ЭТП в экспериментальной и контрольной группах соответственно, что может быть связано как с влиянием пищевой нагрузки, так и с достоверно повышенным показателем абсолютной СММ в экспериментальной группе (таблица 9), поскольку по доле метаболически активных компонентов тела (%СММ от БМТ и %АКМ от БМТ) лыжники-гонщики не отличались от группы сравнения. По уравнению Харриса-Бенедикта ВОО была ниже ЭТП на 13% и 4% в экспериментальной и контрольной группах соответственно (рисунок 10), что согласуется с результатами другого обследования (Людицина и др., 2022). Достоверных отличий между группами по ВОО на основе уравнения Харриса-Бенедикта не было обнаружено, тем не менее, группы отличались ростовым показателем ($p < 0.05$), что позволяет предположить, что весо-возрастные параметры нивелируют ростовые. Кроме того, разница ВОО между группами по уравнению Харриса-Бенедикта может быть незначительна из-за отсутствия статистически значимой разницы между возрастом и абсолютными значениями массы тела (таблица 8), которые учитываются в данном уравнении. К тому же, было показано (Jagim et al., 2018), что для прогнозирования ВОО у спортсменов мужского пола наиболее точно подходит уравнение Харриса-Бенедикта в силу наименьшего значения среднеквадратичной ошибки относительно других формул прогнозирования ВОО.

Учитывая, что большинство спортсменов обследованы с перерывом не более 1 суток после умеренной тренировки (у лыжников-гонщиков в подготовительный период более 80% тренировочного времени связано с аэробными нагрузками) и влияние стандартизированного углеводного завтрака минимально (Бушманова и др., 2023), мы полагаем, что разница в 13% по уравнению Харриса-Бенедикта может быть вызвана существенным вкладом многолетнего спортивного стажа. Доказано, что интенсивные тренировки подготовительного периода значительно увеличивают значение ЭТП (Wasserfurth et al., 2020), эффект которых зависит от

режима и интенсивности физических нагрузок, а также от степени тренированности спортсмена (Konopka, Harber, 2014; MacKenzie-Shalders et al., 2020).

По отношению к ВОО все органы и ткани организма можно подразделить на значимые и малозначимые. Одни являются метаболически и функционально активными, именно их деятельность определяет удельный вклад в формирование энерготрат организма в целом, другие, в частности, жировая ткань, практически не влияют на величину ЭТП (Соколов и др., 2012). Так, АКМ имеет относительно высокую удельную по массе скорость метаболизма и составляет 20-25% ЭТП у среднестатистического взрослого человека. На СММ взрослого человека, не страдающего ожирением, приходится около 25% ЭТП. Жировая ткань, служащая основным хранилищем энергии организма – триглицеридов, имеет низкую удельную скорость метаболизма – менее 1% ЭТП (Heymfield et al., 2018).

В нашем обследовании вне зависимости от различий в компонентном составе тела между группами, была обнаружена достаточно высокая корреляционная связь величин ЭТП от показателей БИА (таблица 10). Исключение составляет только зависимость ЭТП от ЖМТ, коэффициент ранговой корреляции Спирмена для которой был ниже ($r_s=0.41$) относительно других параметров состава тела. Данные результаты подтверждают тот факт (Соколов и др., 2012; Heymfield et al., 2018; Grzebisz, 2020), что больший вклад в ЭТП (на кг массы тела) оказывают метаболически активные параметры компонентного состава тела, такие как СММ, а жировая ткань, напротив, оказывает минимальное влияние на удельные ЭТП.

Таким образом, у большинства спортсменов наблюдалось систематическое занижение ВОО, рассчитанного по формуле Харриса-Бенедикта, в среднем на 13% по сравнению с ЭТП, измеренными методом непрямой калориметрии. Вероятно, это расхождение обусловлено различиями в методиках оценки и, в значительной степени, тонизирующим эффектом, оказываемым многолетней тренировочной нагрузкой. В нашем исследовании показано, что использование метода БИА в спорте позволяет оперативно оценить эффекты тренировочного процесса и определить адаптационные сдвиги в компонентном составе тела, происходящие

под воздействием физических нагрузок и проявляющиеся в повышении выносливости организма, в динамике тренировочного цикла. Учитывая тот факт, что во многих видах спорта, в частности в лыжных гонках, компонентный состав тела рассматривается как один из определяющих факторов результативности спортивной деятельности, в этом контексте мониторинг состава тела приобретает еще более решающее значение. Кроме того, показатели компонентного состава тела, имеющие высокую степень корреляции с энергообменом в покое, важно учитывать для ориентировочной оценки величины ЭТП, как одного из самых крупных компонент общего суточного расхода энергии, и лежащей в основе формирования персонализированных рационов питания.

4.3 Энергетический баланс у экспериментальной группы в разные периоды годового цикла

При анализе ЭП была обнаружена высокая вариативность энергетической ценности рационов питания у лыжников-гонщиков (таблица 12), что согласуется с данными литературы (Boulay et al., 1994; Sjödin et al., 1994; Papadopoulou et al., 2012). Только 44% обследованных лыжников-гонщиков в подготовительный период годового цикла придерживались ЭП, рекомендованного для спортсменов, тренирующих выносливость. Энергетическая ценность рациона остальных 56% спортсменов в подготовительный период была ниже 4000 ккал. При этом, в соревновательный период годового цикла ЭП у всех обследуемых соответствовало диетическим рекомендациям.

Спортсменам, тренирующим выносливость, следует придерживаться рациона питания, включающего не менее 144 г/сут белков, 100 г/сут жиров и 541 г/сут Угл при физической нагрузке умеренной интенсивности в подготовительный период, а также диеты, включающей не менее 162 г/сут белков, 120 г/сут жиров и 722 г/сут Угл при физической нагрузке высокой интенсивности в соревновательный период годового цикла (Kerksick et al., 2018; Jagim et al., 2021; Методические рекомендации..., 2023). Наблюдаемое в нашем исследовании

избыточное потребление жиров (таблица 12), вероятно, компенсировало общий дефицит калорий в рационе питания спортсменов. Фактически, в ходе опроса почти все респонденты отметили, что им приходилось удовлетворять свои потребности в еде самостоятельно, покупая дополнительные продукты в магазинах (молочные продукты, фрукты, орехи, сладости и фаст-фуд), что является не редкостью среди спортсменов (Rosenbloom et al., 2002; Jagim et al., 2021) в подготовительный и особенно в соревновательный периоды годового цикла. Индивидуальные рационы питания содержали недостаточное количество углеводного компонента и избыток жиров, что повышает риск развития утомления и состояния перетренированности, снижает устойчивость к заболеваниям и воздействию неблагоприятных факторов (Aslanekeser, Balci, 2017; Физиолого-биохимические..., 2019; Li et al., 2020).

Обнаруженная нами корреляционная связь между фактическим потреблением макронутриентов и МПК подтвердила участие энергетических субстратов (Угл и жиров) в энергообеспечении максимальной физической нагрузки.

При сравнении показателя ЭТП в подготовительный и соревновательный периоды годового цикла не было обнаружено разницы в абсолютных значениях ЭТП (ккал/сут), в то время как между относительными значениями ЭТП (на кг массы тела) была выявлена достоверная разница ($p=0.035$). Снижение ЭТП от подготовительного (2111.2 ± 294.3 ккал/сут) к соревновательному (1891.6 ± 504.9 ккал/сут) периоду может быть связано с особенностями компонентного состава тела, особенно БМТ из-за адаптации к физическим нагрузкам. Выявленные корреляционные связи между ЭТП и БМТ, а также ЭТП и %ЖМТ в соревновательный период показали, что, снижение этих параметров приводит к уменьшению ЭТП. Кроме того, изменение ЭТП может рассматриваться как эффект регулярной физической нагрузки (MacKenzie-Shalders et al., 2020) или как результат изменения рациона питания (Silva et al., 2017).

Установлено (Wasserfurth et al., 2020), что интенсивные физические нагрузки, которые испытывают спортсмены в подготовительный период годового цикла

значительно повышают уровень ЭТП. Учитывая, что лыжники-гонщики имели как минимум пятилетний спортивный стаж, было ожидаемым наличие высоких значений ЭТП. При этом, эффект влияния аэробных физических нагрузок зависит от длительности и интенсивности физической нагрузки, а также от уровня физической подготовленности спортсмена (Konopka, Harber, 2014). Поскольку более 80% тренировочного времени в подготовительный период у лыжников-гонщиков связано с аэробными физическими нагрузками, мы можем предположить, что более высокие значения ЭТП в этот период вызваны многолетней адаптацией к физическим нагрузкам.

По данным литературы (MacKenzie-Shalders et al., 2020), незначительное уменьшение ЭТП в соревновательный период, вероятно, связано со снижением тренировочной нагрузки по сравнению с подготовительный периодом. Соревновательная деятельность спортсменов сопровождается стрессом (MacKenzie-Shalders et al., 2020), который влечет за собой повышенную активность эндокринной системы, приводящей к активной мобилизации энергетических субстратов. В дополнение к этим факторам (MacKenzie-Shalders et al., 2020), физическая нагрузка может влиять на состояние щитовидной железы, белковый обмен, циркулирующий лептин, термогенез, стимуляцию β -адренергических функций и митохондриальную активность в клетках печени.

Энергетическая ценность рациона спортсмена, соответствующая суточным энергозатратам, является одним из важнейших условий эффективного тренировочного процесса. В нашем исследовании значения суточных энергозатрат у лыжников-гонщиков в подготовительный период были выше, чем в соревновательный период, что подтверждает тот факт, что лыжные-гонки является энергозатратным видом спорта. При интенсивных тренировках и во время соревнований по лыжным гонкам значения суточных энергозатрат могут составлять 4800-6000 ккал/сут, что показано в нашем исследовании, иногда достигая 8000 ккал/сут (Frączek et al., 2019). Во время соревновательного периода годового цикла эти значения могут превышать 10000 ккал/сут (Kerksick et al., 2018).

Тренировочные дни подготовительного периода годичного цикла характеризуются преимущественно физическими нагрузками умеренной интенсивности, что повышает выносливость и обеспечивает более эффективное использование энергетических субстратов. К концу подготовительного периода объем физических нагрузок уменьшается, а интенсивность постепенно увеличивается. Цель этого периода – достичь максимальной физической работоспособности и перенести тренировочный эффект в соревновательный период, где интенсивность физической нагрузки максимальна. За неделю до важного соревнования объем и интенсивность физических нагрузок обычно снижаются, чтобы позволить организму оптимально восстановиться перед соревнованиями (Matveyev, 1975). В нашем исследовании в дни интенсивных физических нагрузок вовремя подготовительного периода все обследуемые лыжники-гонщики подвергались длительному состоянию энергетического дефицита (около 1017 ккал при наличии НДЭ), что может повлечь за собой истощение функциональных резервов организма. Поэтому, приближаясь к важным соревнованиям, многие спортсмены могут не достичь своих максимальных результатов из-за истощения энергетических запасов. Кроме того, относительный энергодефицит не сопровождался отрицательным азотистым балансом, на что указывает референсные значения мочевины у спортсменов и статистически недостоверное снижение массы тела к соревновательному периоду среди обследуемых лыжников-гонщиков.

Наиболее очевидным объяснением выявленного относительного энергодефицита, вероятно, является распространенная проблема занижения данных при самооценке ЭП спортсменами, которая может составлять 10-45% от суточных энергозатрат (Magkos, Yannakouli, 2003). Другим объяснением дефицита энергии может быть погрешность метода 24-часового воспроизведения питания, используемого для оценки ЭП у спортсменов. И наконец, значительный энергодефицит в подготовительный период также может быть объяснен тем фактом, что в рационе питания у 78% спортсменов было снижено потребление Угл, у 89% – потребление белков по сравнению с нормативными значениями на фоне

высокоинтенсивной физической нагрузки в подготовительный период годового цикла.

В подготовительный период годового цикла краткосрочный и незначительный дефицит энергии, приводящий к увеличению использования энергетических запасов, имеет место быть с целью достижения максимальной физической формы, но в период соревнований ЭБ должен поддерживаться на стабильном уровне (Wasserfurth et al., 2020). Было проведено исследование, имитирующее гонку «Тур де Франс» в метаболической камере, для расчета суточного ЭБ на основе значений суточных энерготрат и ЭП (Brouns et al., 1989). Положительный суточный ЭБ был обнаружен в период восстановления, в то время как значительно отрицательный суточный ЭБ наблюдался в тренировочные дни. Кроме того, большинство исследований показывают, что спортсмены испытывают значительный дефицит энергии в определенные дни тренировок или соревнований на фоне длительных высокоинтенсивных физических нагрузках (Fudge et al., 2006; Heydenreich et al., 2017), что является следствием НДЭ (Wasserfurth et al., 2020). Спортсмены также могут непреднамеренно столкнуться с НДЭ в периоды повышенного объема физических нагрузок или при занятиях видами спорта с высокими энерготратами (например, лыжные гонки), а также при несоответствующему расходу энергии ЭП (Loucks, 2004; Burke, 2011; Frączek et al., 2019; Wasserfurth et al., 2020). В нашем исследовании в подготовительный период значения ДЭ составляли <15 ккал/кг БМТ/сут и варьировались от 5 до 33 ккал/кг БМТ/сут, что соответствовало исследованиям по НДЭ у спортсменов (Loucks, 2004; Wasserfurth et al., 2020). Кроме того, развитие НДЭ у лыжников-гонщиков в подготовительный период ассоциировано с недостаточным потреблением Угл ($r_s=0.75$, $p<0.05$) и со снижением энергетической ценности рациона ($r_s=0.58$, $p<0.05$).

Среди факторов, оказывающих влияние на достижение высоких результатов в лыжных гонках, важную роль играет работа кислородно-транспортной системы и способность скелетных мышц к окислению жиров и Угл, которые имеют первостепенное значение в энергообеспечении физической (Hall et al., 2016;

Gagnon et al., 2019) и аэробной работоспособности спортсменов (Lyudinina et al., 2020). Наиболее значимыми факторами в приоритете распределения энергетических субстратов при физической нагрузке являются продолжительность и интенсивность нагрузки (Henderson et al., 2007; Физиолого-биохимические механизмы..., 2019). Внутримышечные триглицериды и гликоген не вносят значительного вклада в выработку энергии при интенсивности нагрузки 25% от МПК. При нагрузках субмаксимальной интенсивности (40-65% МПК) наблюдается в равной степени максимальная СОЖ и высокая доступность свободных ЖК за счет липолиза в периферических и внутримышечных адипоцитах (Achten, Jeukendrup, 2003). Прогрессирующее снижение метаболизма ЖК в плазме при увеличении интенсивности упражнений с 65% до 85% МПК, по-видимому, компенсируется увеличением оборота глюкозы в крови; поэтому вклад плазменных субстратов в расход калорий остается постоянным в этом широком диапазоне интенсивности упражнений (т.е. 25-85% МПК) (Achten, Jeukendrup, 2003).

Установлено (Achten, Jeukendrup, 2003), что при анаэробных нагрузках жиры окисляются с низкой интенсивностью, а Угл – в основном, с высокой, однако вклад окисления жиров в общий расход энергии во время упражнений при МПК выше 85% обычно игнорируется.

В этой работе (рисунок 11) мы обнаружили уменьшение процентного вклада Угл и соответствующее увеличение доли жиров в энерготраты по мере увеличения интенсивности максимальной физической нагрузки, что полностью соответствует результатам предыдущих исследований (Aslankeser, Balci, 2017; Li et al., 2020). Выявленная разница в процентном вкладе жиров и Угл в энерготраты указывает на то, что спортсмены эффективно используют жиры при физической нагрузке высокой интенсивности подходя к соревновательному периоду годичного цикла. Следует отметить (таблица 11), что %ЖМТ у спортсменов в соревновательный период был значительно ниже, чем в подготовительный период (9% и 11% соответственно), хотя оба параметра находились в пределах нормы для лыжников-гонщиков (Udebake et al., 2019; Grzebisz, 2020). Можно предположить, что значительное увеличение вклада жиров в энерготраты при максимальной

физической нагрузке к соревновательному периоду объясняется повышенной скоростью утилизации жиров, которая совпадает с увеличением МПК, что отражено в ранее проведенном нами исследовании (Lyudinina et al., 2020).

Хотя верхний предел липолиза у людей неизвестен, мобилизация и окисление жиров были более интенсивными у спортсменов с высокими аэробными показателями (Lyudinina et al., 2020). Более того, в исследованиях с использованием непрямой калориметрии показано, что при увеличении интенсивности физической нагрузки происходит активизация анаэробной энергетической системы, и вследствие активации бикарбонатной буферной системы вырабатывается дополнительная продукция углекислого газа, что может привести к завышению вклада Угл и недооценке жиров (Achten, Jeukendrup, 2003); следовательно, представляется актуальным дальнейшее изучение степени участия макроэлементов в энергообеспечение физической нагрузки различной интенсивности.

Таким образом, кратковременные НДЭ и отрицательный ЭБ у лыжников-гонщиков, наблюдавшиеся в начале подготовительного периода, вероятно, были вызваны недостаточным ЭП, повышенными ЭТП и суточным расходом энергии на фоне высокоинтенсивных и объемных тренировочных нагрузок в те дни, когда мы обследовали спортсменов. Представленное исследование показало, что в начале подготовительного периода (июнь) у высококвалифицированных лыжников-гонщиков наблюдался дисбаланс в питании (таблица 12), который мог повлиять на их результаты в соревновательный период годичного цикла.

4.4 Энерготраты в покое и при субмаксимальной физической нагрузке у экспериментальной группы

Разделение исходной группы спортсменов по результатам тестирования в зависимости от способности спортсменов преодолеть ПАНО не выявило значимых отличий в ЭТП, однако вклад жиров и Угл в структуру ЭТП отличался между группами (рисунок 12). Сниженный ДК в I группе свидетельствует о том (Burke, Hawley, 2002), что большая часть энергии в покое вырабатывается за счет

окисления жиров, активное использование которых с целью энергообеспечения организма позволяет «экономить» лимитированный гликоген (Burke, Hawley, 2002; Maunder et al., 2018), вероятно, даже в состоянии покоя. Показано, что среднее значение ДК в покое, равное 0.82, отражает тот факт, что организм получает более половины энергии при окислении ЖК, а остающуюся часть из глюкозы. При этом в состоянии покоя количество ЖК, высвобождаемых из жировой ткани в плазму, обычно превышает их скорость окисления и часть потока ЖК окисляется для получения энергии, а остальные – повторно этерифицируются в триглицериды в печени (Melzer, 2011). В II группе, которую можно охарактеризовать как более выносливую по физической подготовленности в сравнении с I группой, процентное соотношение Угл и жиров в структуре ЭТП было приближенное к 1:1. Ранее нами было показано (Людицина и др., 2022), что выносливые лыжники-гонщики имеют примерно равный процентный вклад Угл и жиров в ЭТП при дальнейшем выполнении максимальной физической нагрузки. Учитывая вышеизложенное, соотношение этих макронутриентов примерно равное 1:1 в структуре ЭТП может стать маркером высокой физической работоспособности спортсменов, однако для этого необходимо проведение дальнейших исследований.

Окисление энергетических субстратов и соответственно вариабельность ЭТП напрямую взаимосвязаны с ПК, что подтверждают обнаруженные нами корреляционные связи (таблица 14). Однако, в I группе фоновое ПК отрицательно коррелирует с СОУгл в покое, что, вероятно, объясняется повышенным запросом в кислороде на процессы окисления жиров, которые вносят большой вклад в ЭТП или экономизацией Угл даже в состоянии покоя у спортсменов I группы.

При физических нагрузках увеличение интенсивности работы приводит к росту ПК, и, как следствие, к повышенному запросу энергии в виде АТФ, которая может поставляться через аэробный и анаэробный метаболические пути, выбор которого напрямую зависит от степени тренированности организма, интенсивности и длительности физической нагрузки (Melzer, 2011). Когда мощность внешней работы превышает возможности аэробного механизма энергообеспечения, то начинают использоваться анаэробные источники, а именно

анаэробный гликолиз, который ведет к образованию лактата и ионов водорода, и алактатный механизм, связанный с использованием энергии молекул АТФ (Rømer et al., 2020). Поэтому для нагрузок субмаксимальной мощности утомление, прежде всего, связано с кислородно-транспортной системой из-за недостаточного снабжения мышц кислородом (Rømer et al., 2020).

При субмаксимальной физической нагрузке (до ПАНО) по сравнению с фоновыми показателями макронутриентов (таблица 15) в I группе идет переключение субстратного энергообеспечения с жирового на углеводный, при этом доля Угл возрастает в 6.7 раз относительно фона. Вероятно, именно поэтому спортсмены I группы способны выполнить тест только до ПАНО, поскольку (Melzer, 2011) при аэробных нагрузках одним из главных механизмов утомления является расходование мышечного гликогена, лимитирующего работоспособность. Напротив, в II группе в энергообеспечение субмаксимальной физической нагрузке до ПАНО включаются жиры, доля которых увеличивается в 7 раз относительно фоновых значений, что позволяет отодвигать момент истощения лимитированного гликогена (Melzer, 2011; Andersson Hall et al., 2016), и как следствие, повышать продолжительность выполнения физической нагрузки. Следует отметить важный факт (таблица 13), что у спортсменов II группы значимо меньший процент жира в составе тела по сравнению с группой I (соответственно, 10% и 12%), хотя оба показателя находятся в пределах нормативных значений (Udebake et al., 2019; Grzebisz, 2020), соответствующих лыжным гонкам. Можно предположить, что значительное увеличение вклада жиров в энерготраты субмаксимальной физической нагрузки (до ПАНО) у спортсменов II группы обусловлено более высокой скоростью их утилизации, что отражено ранее в работе (Lyudinina et al., 2020). Также в пользу высокой скорости окисления жиров у наиболее выносливых спортсменов свидетельствует более низкое содержание жира в их организме, несмотря на избыточное потребление жиров на фоне дефицита углеводного компонента в питании лыжников-гонщиков (Физиолого-биохимические..., 2019).

Показано (Jacobs, Lundby, 2013; Glancy et al., 2015), что у элитных спортсменов, тренирующихся на выносливость, хорошо выражен мышечный

митохондриальный ретикулум, что обуславливает метаболическую гибкость организма – способность переключаться между окислением липидов и Угл в зависимости от потребности в энергии и доступности субстрата при физических нагрузках. Спортсмен во время аэробной нагрузки получает относительно больше энергии за счет окисления жиров и соответственно меньше за счет окисления Угл по сравнению с нетренированными лицами. Такой субстратный энергетический сдвиг в сторону преимущественного использования жиров может быть обозначен как «жировой сдвиг» (или активизация метаболизма липидов) (Da Voit et al., 2016; Andersson Hall et al., 2016), который позволяет элитным спортсменам экономичнее расходовать мышечный гликоген и тем самым отодвигать момент его истощения, а, следовательно, повышать продолжительность выполнения нагрузки и развивать выносливость.

Установлено (Achten, Jeukendrup, 2003; Lyudinina et al., 2020), что в большей степени жиры окисляются при физических нагрузках низкой и умеренной интенсивности, а Угл окисляются в основном при высокой интенсивности, однако вклад окисления жиров в общий расход энергии во время физических нагрузках при МПК выше 85% обычно игнорируется. Измерение концентрации лактата в крови и ДК являются косвенными методами оценки метаболической гибкости, работы митохондрий и окислительной способности организма во время физических нагрузок (San-Millán, Brooks, 2018). Показано (Dong, 2021), что лактат может выступать в качестве энергетического субстрата для миокарда во время физической нагрузки, при этом основным энергетическим субстратом мышц у высококвалифицированных спортсменов являются жиры, по сравнению с малотренированными людьми, у которых преобладает углеводно-зависимое энергообеспечение (San-Millán, Brooks, 2018).

Показатели физической и аэробной работоспособности коррелируют с энерготратами за тест (таблица 16). Уже установлено (Purcell et al., 2020; Варламова и др., 2021), что МПК является одним из предикторов работоспособности у спортсменов, тренирующихся на выносливость. Наши результаты показали, что абсолютные значения МПК между группами не отличались, однако в I группе ПК

ПАНО было значительно выше, чем в группе II. Мы полагаем, что достоверно сниженное ПК ПАНО на 20% относительно МПК в II группе может свидетельствовать об экономизации функциональных резервов и возможности организма выполнять физическую нагрузку в течение длительного времени, в том числе и в анаэробном режиме. Выявленные взаимосвязи между энерготратами и основными показателями физической и аэробной работоспособности могут быть использованы в оценке функционального состояния и результативности высококвалифицированных спортсменов.

Таким образом, процентное соотношение жиров и Угл, приближенное к 1:1 в структуре ЭТП, у спортсменов, тренирующих выносливость и способных выполнять максимальную физическую нагрузку, может стать перспективным маркером высокой физической работоспособности. У спортсменов, выполнивших тестирование «до отказа», в структуре энерготрат при физической нагрузке субмаксимальной мощности происходит экономизация углеводов на фоне активного использования жиров, что позволяет увеличить продолжительность работы и отсрочить утомление. Именно поэтому сочетанную оценку энерготрат с учетом вклада энергетических субстратов, показателей физической и аэробной работоспособности следует активно вовлекать в изучение и оценку результативности высококвалифицированных спортсменов.

ВЫВОДЫ

1) Безжировая масса, скелетно-мышечная масса, активноклеточная масса, белки и общая вода организма в совокупности являются ключевыми детерминантами удельных энерготрат покоя у высококвалифицированных лыжников-гонщиков, вклад которых превышает таковой у молодых людей, не занимающихся спортом.

2) Уравнение прогнозирования Харриса-Бенедикта занижает величину основного обмена на 13% и 4% относительно измеренных энерготрат покоя у высококвалифицированных лыжников-гонщиков и молодых людей, не занимающихся спортом соответственно.

3) Энергетическая ценность рационов питания высококвалифицированных лыжников-гонщиков снижена на 10% относительно норм в подготовительный период в отличие от соревновательного периода. При этом, в дни интенсивных физических нагрузок вне зависимости от периода годового цикла у всех лыжников-гонщиков обнаружен недостаток углеводов и белков на фоне избыточного потребления жирового компонента в рационе питания.

4) Соотношение жиров и углеводов в структуре энерготрат покоя и энерготрат при субмаксимальной физической нагрузке, приближенное к 1:1, у высококвалифицированных лыжников-гонщиков является информативным маркером физической работоспособности. Увеличение вклада углеводов в энергообеспечение субмаксимальной физической нагрузки по сравнению с их фоновым уровнем лимитирует физическую работоспособность в анаэробной зоне у лыжников-гонщиков.

5) В подготовительный период (июнь) у высококвалифицированных лыжников-гонщиков, членов сборных команд Республики Коми и России, в дни высокоинтенсивных физических нагрузок выявлена низкая доступность энергии, ассоциированная со снижением энергетической ценности рационов и недостаточным потреблением углеводного компонента питания в отличие от соревновательного периода (март).

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Полученные данные рекомендуется использовать при формировании индивидуальных программ питания спортсменов. Для повышения эффективности тренировочного процесса и роста спортивных результатов необходимо производить учет энерготрат с оценкой вклада жиров и углеводов, а также отслеживать динамику изменений компонентного состава тела в годичном цикле. Для предупреждения развития относительного дефицита энергии в спорте рекомендуется осуществлять мониторинг суточного энергетического баланса и производить расчет доступности энергии.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- %ЖМТ – процент жировой массы тела
- RED-S – относительный дефицит энергии в спорте (с англ. Relative energy deficit in spots)
- АКМ – активноклеточная масса тела
- АТ – адаптивный термогенез
- АТФ – аденозинтрифосфат
- БИА – биоимпедансный анализ
- БМТ – безжировая масса тела
- ВОО – величина основного обмена
- ДК – дыхательный коэффициент
- ДЭ – доступность энергии
- ЖК – жирные кислоты
- ЖМТ – жировая масса тела
- ИФР-1 – инсулиноподобный фактор роста -1
- КФА – коэффициент физической активности
- МПК – максимальное потребление кислорода
- НДЭ – низкая доступность энергии
- ПАНО – порог анаэробного обмена
- ПК – потребление кислорода
- ПОЛ – перекисное окисление липидов
- ПОМК – проопиомеланокортин
- ПП – подготовительный период годового цикла
- ПТ – пищевой термогенез
- СММ – скелетно-мышечная масса тела
- СНС – симпатическая нервная система

СОБ – скорость окисления белков

СОЖ – скорость окисления жиров

СОУгл – скорость окисления углеводов

СП – соревновательный период годичного цикла

СРО – свободнорадикальное окисление

Угл – углеводы

цАМФ – циклический аденозинмонофосфат

ЧСС – частота сердечных сокращений

ЭБ – энергетический баланс

ЭП – энергопотребление

ЭТП – энерготраты покоя

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авцын, А.П. Патология человека на Севере / А.П. Авцын. – М.: Медицина, 1985. – 416 с.
2. Агаджанян, Н.А. Критерии адаптации и экопортрет человека / Н.А. Агаджанян // Бюлл. СО АМН СССР. – 1981. – № 6. – С. 35.
3. Агаджанян, Н.А. Экологический портрет человека на Севере / Н.А. Агаджанян, Н.В. Ермакова. – М.: «КРУК», 1997. – 207 с.
4. Биоимпедансное исследование состава тела населения России / С.Г. Руднев, Н.П. Соболева, С.А. Стерликов, Д.В. Николаев, О.А. Старунова, С.П. Черных, Т.А. Ерюкова, В.А. Колесников, О.А. Мельниченко, Е.Г. Пономарёва. М.: РИО ЦНИИОИЗ, 2014. – 493 с.
5. Бойко, Е.Р. Обеспеченность населения Севера жирорастворимыми витаминами / Е.Р. Бойко, Н.Н. Потолицына, Г.С. Бойко, В.Е. Ларина, В.А. Зеленев // Вопросы питания. – 2008. – Т. 77. – № 3. – С. 64-67.
6. Бойко, Е.Р. Основные аспекты метаболической адаптации человека на Севере. Человек на Севере: системные механизмы адаптации: сборник трудов, посвященных 15-летию МНИЦ «АРКТИКА» ДВО РАН / Е.Р. Бойко, А.Л. Максимов, Т.В. Годовых, Ф.А. Бичкаева. – Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2007. – 228 с.
7. Бойко, Е.Р. Фосфолипидный профиль у жителей европейского Севера России / Е.Р. Бойко, Ф.А. Бичкаева // Физиология человека. – 2000. – Т. 26. – № 2. – С. 105-110.
8. Бойко, Е. Р. Физиолого-биохимические основы жизнедеятельности человека на Севере / Е. Р. Бойко. Институт физиологии Коми НЦ, Уральское отделение Российской академии наук. – Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 2005. – 190 с.

9. Бушманова, Е.А. Влияние пищевого термогенеза низкокалорийной углеводной нагрузки на энерготраты покоя / Е.А. Бушманова, Т.П. Логинова, А.Ю. Людина // Журн. мед.-биол. исследований. – 2023. – Т. 11. – № 2. – С. 153-161.
10. Бышевский, А.Ш. Витамины, липидпероксидация и гемостаз / А.Ш. Бышевский, Е.А. Винокурова, С.Л. Галян, И.А. Дементьева, Е.В. Забара, И.В. Зверева, И.А. Карпова, В.А. Полякова, И.В. Ральченко, А.Ю. Рудзевич, Г.А. Сулкарнаева, П.Я. Шаповалов, Е.М. Шаповалова, Т.П. Шевлюкова // Фундаментальные исследования. – 2008. – № 3. – С. 80-81.
11. Варламова, Н.Г. Частота сердечных сокращений, потребление кислорода и артериальное давление у лыжников разной квалификации в тесте «до отказа» / Н.Г. Варламова, Т.П. Логинова, И.О. Гарнов, А.А. Черных, Е.Р. Бойко // Человек. Спорт. Медицина. – 2021. – Т. 21. – № 1. – С. 53-61.
12. Виру, А.А. Гормональные механизмы адаптации и тренировки / А.А. Виру. – Л.: Наука, 1981. – 151 с.
13. Гора, Е.П. Экология человека / Е.П. Гора. – М.: Дрофа, 2007. – С. 544.
14. Гудимов, С.В. Характеристика компонентного состава тела представителей игрового и циклического видов спорта / С.В. Гудимов, А.Н. Шкробко, И.А. Осетров, И.Е. Плещев, М.А. Кузнецов // Спортивная медицина: наука и практика. – 2021– Т. 11. – № 2. – С. 45-51.
15. Денисова, Н.Н. Основные принципы разработки базового рациона питания спортсменов циклических видов спорта / Н.Н. Денисова, Э.Э. Кешабянц, А.Н. Мартинчик, Е.В. Пескова, А.И. Соколов // Вопросы диетологии. – 2022. – Т.12. – № 3. – С. 20-27.
16. Ефимова, Л.П. Показатели липидного обмена у аборигенов севера Сибири / Л.П. Ефимова, В.Е. Кудряшова // Профилактическая и клиническая медицина. – 2009. Т. 30. – № 1. – С. 66-69.
17. Запесочная, И.Л. Особенности артериальной гипертонии в северных регионах страны / И.Л. Запесочная, А.Г. Автандилов // Клиническая медицина. – 2008. – Т. 86. – № 5. – С. 42-44.

18. Захарова, М.Ф. Сравнительный анализ компонентного состава тела спортсменов-любителей, специализирующихся в триатлоне и хоккее / М.Ф. Захарова, Е.Ю. Федорова, М.М. Семенов, А.Ю. Казаков // Психология и педагогика спортивной деятельности. – 2022. – Т. 63– № 3-4. – С. 58-61.

19. Казначеев, В.П. Механизмы адаптации человека в условиях высоких широт / В.П. Казначеев. – Л.: Медицина, 1980. – 200 с.

20. Карамнова, Н.С. Методы изучения питания: варианты использования, возможности и ограничения / Н.С. Карамнова, О.В. Измайлова, О.Б. Швабская // Профилактическая медицина. – 2021. – Т. 24. – № 8. – С.109-116.

21. Коденцова, В.М. Изменение обеспеченности витаминами населения Российской Федерации за период 1987-2009 гг. / В.М. Коденцова, О.А. Вржесинская, В.Б. Спиричев // Вопросы питания. – 2010. – Т. 79. – № 3. – С. 68-72.

22. Коломийцева, И.К. Липиды в гибернации и искусственном гипобиозе млекопитающих (обзор) / И.К. Коломийцева // Биохимия. – 2011. – Т. 76. – № 12. – С. 1604-1614.

23. Людина, А.Ю. Соответствие энергопотребления энерготратам у лыжников-гонщиков в общеподготовительный период / А.Ю. Людина, Е.А. Бушманова, Т.В. Есева, Е.Р. Бойко // Вопросы питания. – 2022. – Т. 91. – № 1. – С. 109-116.

24. Мартынюк, В.С. Экспериментальная верификация электромагнитной гипотезы солнечно-биосферных связей / В.С. Мартынюк // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. Серия «Биология, химия». – 2007. – Т. 20. – № 1. – С. 8-27.

25. Матвеев, Л.П. Проблема периодизации спортивной тренировки / Л.П. Матвеев. – И. «Физкультура и спорт», 1965. – 244 с.

26. Матюхин, В.А. Физиология перемещений человека и вахтовый труд / В.А. Матюхин, С.Г. Кривошеков, Д.В. Демин. – Новосибирск: Наука, 1986. – 200 с.

27. Меерсон, Ф.З. Адаптация, стресс, профилактика / Ф.З. Меерсон – М.: Наука, 1981. – 229 с.

28. Методические рекомендации «Рекомендации по включению в базовый рацион питания высококвалифицированных спортсменов специализированных пищевых продуктов для оптимизации метаболических процессов при сверхвысоких нагрузках». – М.: ООО «Мультипринт», 2023. – 56 с.

29. Милованов, А.П. Адаптация малого круга кровообращения человека в условиях Севера / А.П. Милованов. – Новосибирск: Наука, 1981. – 172 с.

30. Морфологические критерии – показатели пригодности, общей физической подготовленности и контроля текущей и долговременной адаптации к тренировочным нагрузкам: Учебно-методическое пособие / Т.Ф. Абрамова, Т.М. Никитина, Н.И. Кочеткова. М.: ТВТ Дивизион, 2010. – 104 с.

31. Нагибович, О.А. Механизмы гипоксии в Арктической зоне Российской Федерации / О.А. Нагибович, Д.М. Уховский, А.Н. Жекалов, Н.А. Ткачук, Л.Г. Аржавкина, Е.Г. Богданова, Е.В. Мурзина, Т.М. Беликова // Вестник Российской военно-медицинской академии. – 2016. – Т. 2. – № 54. – С. 202-205.

32. Намгаладзе, А.А. Математическое моделирование термосферных и ионосферных эффектов геомагнитной бури / А.А. Намгаладзе. – Физика околоземного космического пространства. Мурманск: ПГИ, 2000. – С. 336-360.

33. Неверова, Н.П. Состояние вегетативной функции здоровых людей в условиях Крайнего Севера: Автореф. дис. д-ра мед. наук: 14.00.17 / Неверова Нина Петровна. – Новосибирск, 1972. – 39 с.

34. Никитин, Ю.П. Перекисное окисление липидов и антиокислительная активность липидов у населения Чукотки и ишемическая болезнь сердца / Ю.П. Никитин, Д.А. Шакалис, В.И. Хаснулин // Физиологические и клинические аспекты адаптации систем кровообращения и дыхания на Крайнем Севере: сб. статей. – 1981. – С.16-19.

35. Николаев, Д.В. Биоимпедансный анализ: основы метода. Протокол обследования и интерпретация результатов / Д.В. Николаев // Спортивная медицина: наука и практика. – 2012. – № 2. – С. 29-36.

36. Орлов, С.В. Рациональное питание в спорте / С.В. Орлов // Современные проблемы теории и практики развития физической культуры и

спорта: материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной памяти ученого-педагога, доктора пед. наук, профессора, члена-корреспондента РАЕН Минбулатова Вагаба Минбулатовича, Махачкала, 13 мая 2022 года. – Махачкала: Дагестанский государственный педагогический университет, 2022. – С. 98-100.

37. Панин, Л.Е. Гомеостаз и проблемы приполярной медицины (методологические аспекты адаптации) / Л.Е. Панин // Бюл. СО РАМН. – 2010. – Т. 3. – № 3. – С. 6-11.

38. Панин, Л.Е. Некоторые биохимические аспекты проблемы адаптации / Л.Е. Панин // Медико-биологические аспекты процессов адаптации. – 1975. – С. 14-18.

39. Петрова, П.Г. Здоровье населения и экология Республики Саха (Якутия): методическое пособие для студентов, врачей и организаторов здравоохранения / П.Г. Петрова, А.Я. Кульберг, А.И. Воложин, Ф.А. Захарова. – М., 1995. – 90 с.

40. Потолицына, Н.Н. Витаминный статус жителей Европейского Севера России и его зависимость от географической широты / Н.Н. Потолицына, Е.Р. Бойко // Журнал медико-биологических исследований. – 2018. – Т. 6. – № 4. – С. 376-386.

41. Рылова, Н.В. Актуальные аспекты изучения состава тела спортсменов / Н.В. Рылова // Казанский медицинский журнал. – 2014. – Т. 95. – № 1. – С. 108-111.

42. Саввинов, Д.Д. Среда обитания и здоровье человека на Севере: эколого-медицинский аспект // Д.Д. Саввинов, П.Г. Петрова, Ф.А. Захарова. – Новосибирск: Наука, 2005. – 291 с.

43. Севостьянова, Е.В. Особенности липидного и углеводного метаболизма человека на севере (литературный обзор) / Е.В. Севостьянова // Бюллетень сибирской медицины. – 2013. – Т. 12. – № 1. С. 93-100.

44. Сидун, Д.Ю. Разработка программного модуля для расчета величины основного обмена / Д.Ю. Сидун, О.В. Филатова, Л.А. Хворова // Сборник трудов

Всероссийской конференции по математике «МАК-2016». Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2016. – С. 222-224.

45. Снодграсс, Д.Д. Метаболическая адаптация якутов (САХА) / Д.Д. Снодграсс, В.Р. Роув, Л.А. Тарская, Т.М. Климова, В.И. Федорова, М.Е. Балтахинова, В.Г. Кривошапкин // Якутский мед. журн. – 2011. – № 2. – С. 1-14.

46. Соколов, А.И. Состав тела и энергообмен в покое / А.И. Соколов, С.Х. Сото, И.Б. Тарасова, Р.С. Рахмонов, А.В. Васильев // Вопросы питания. – 2012. – Т. 81. – № 2. – С. 12-17.

47. Солонин, Ю.Г. Результаты 5-летнего лонгитудинального наблюдения за физической работоспособностью высокотренированных лыжников / Ю.Г. Солонин, И.О. Гарнов, Т.П. Логинова, А.Л. Марков, А.А. Черных, А.В. Ватлин, Т.М. Командресова, Е.Р. Бойко // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Биология и экология. – 2020. – Т. 58. – № 2. – С. 7-18.

48. Справочник по работе с таблицей результатов «Анализ состава тела в вопросах и ответах». Группа клинических исследований компании SELVAS Healthcare. – SELVAS Healthcare Inc, 2017. – 38 с.

49. Сукач, Е.С. Композиционный состав тела юных спортсменов, занимающихся циклическими видами спорта / Е.С. Сукач, Будько Л.А. // Проблемы здоровья и экологии. – 2018. Т. 55. – № 1. – С. 83-87

50. Ткачев, А.В. Эндокринная система и обмен веществ у человека на Севере / А.В. Ткачев, Е.Р. Бойко, З.Д. Губкина, Е.Б. Раменская, С.Г. Суханов. – Сыктывкар: Коми научный центр УрО РАН, 1992. – 152 с.

51. Физиолого-биохимические механизмы обеспечения спортивной деятельности зимних циклических видов спорта / Отв. ред Бойко Е.Р. – Сыктывкар: ООО «Коми республиканская типография», 2019. – 256 с.

52. Физиолого-биохимические основы жизнедеятельности человека на Севере / под ред. Е.Р. Бойко. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 190 с.

53. Хаснулин, В.И. Введение в полярную медицину / В.И. Хаснулин. – Новосибирск: СО РАМН, 1998. – 337 с.

54. Хаснулин, В.И. Современные представления о механизмах формирования северного стресса у человека в высоких широтах / В. И. Хаснулин, П. В. Хаснулин // Экология человека: научный центр клинической и экспериментальной медицины Сибирского отделения РАМН. – 2012. – № 1. – С. 3-11.
55. Шуберт, Э.Е. Биосоциальные аспекты стресс-реакций человека в экстремальной зоне обитания / Э.Е. Шуберт, Е.Э. Шуберт // Северо-Восточный науч. журн. – 2008. – № 2. – С. 41-48.
56. Achten, J. Maximal fat oxidation during exercise in trained men / J. Achten, A.E. Jeukendrup // International Journal of Sports Medicine. – 2003. – V. 24. – № 8. – P. 603-608.
57. Andersson Hall, A.U. Whole-body fat oxidation increases more by prior exercise than overnight fasting in elite endurance athletes / A.U. Andersson Hall, F. Edin, A. Pedersen, K. Madsen // Appl. Physiol. Nutr. Metab. – 2016. – V. 41. – № 4. – P. 430-437.
58. Areta, J.L. Low energy availability: history, definition and evidence of its endocrine, metabolic and physiological effects in prospective studies in females and males / J.L. Areta, H.L. Taylor, K. Koehler // Eur J Appl Physiol. – 2021. – V. 121. – № 1. – P. 1-21.
59. Armstrong, L.E. Nutritional, physiological, and perceptual responses during a summer ultraendurance cycling event // L.E. Armstrong, D.J. Casa, H. Emmanuel, M.S. Ganio, J.F. Klau, E.C. Lee, C.M. Maresh, B.P. McDermott, R.L. Stearns, J.L. Vingren, J.E. Wingo, K.H. Williamson, L.M. Yamamoto // J Strength Cond Res. – 2012. – V. 26. – № 2. – P. 307-318.
60. Aslankeser, Z. Re-examination of the contribution of substrates to energy expenditure during high-intensity intermittent exercise in endurance athletes / Z. Aslankeser, Ş.S. Balcı // PeerJ. – 2017. – 5:e3769.
61. Barbieri, D. Body composition and size in sprint athletes / D. Barbieri, L. Zaccagni, V. Babić, M. Rakovac, M. Mišigoj-Duraković, E. Gualdi-Russo // J Sports Med Phys Fitness. – 2017. – V. 57. – № 9. – P. 1142-1146.

62. Barnard, N.D. The effects of a low-fat, plant-based dietary intervention on body weight, metabolism, and insulin sensitivity / N.D. Barnard, A.R. Scialli, G. Turner-McGrievy, A.J. Lanou, J. Glass // *Am J Med.* – 2005. – V. 118. – № 9. – P. 991-997.
63. Beaulieu, K. High habitual physical activity improves acute energy compensation in nonobese adults / K. Beaulieu, M. Hopkins, C. Long, J. Blundell, G. Finlayson // *Med. Sci. Sport Exerc.* – 2017. – V. 49. – № 11. – P. 2268-2275.
64. Bescós, R. Nutritional behavior of cyclists during a 24-hour team relay race: a field study report / R. Bescós, F.A. Rodríguez, X. Iglesias, B. Knechtle, A. Benítez, M. Marina, J.M. Padullés, P. Torrado, J. Vazquez, T. Rosemann // *Journal of the International Society of Sports Nutrition.* – 2012. – V. 9. – № 1. – P. 1-11.
65. Binns, A. Thermic effect of food, exercise, and total energy expenditure in active females / A. Binns, M. Gray, R. Di Brezzo // *J Sci Med Sport.* – 2015. – V. 18. – № 2. – P. 204-208.
66. Blasco Redondo R. Resting energy expenditure; assessment methods and applications / R. Blasco Redondo // *Nutr Hosp.* – 2015. – V. 31. – Suppl 3. – P. 245-254.
67. Boulay, M.R. Energy expenditure measurement in male cross-country skiers: comparison of two field methods / M.R. Boulay, O. Serresse, N. Almeras, A. Tremblay // *Medicine & Science in Sports & Exercise.* – 1994. – V. 26. – № 2. – P. 248-253.
68. Bowden, V.L. Effects of training status on the metabolic responses to high carbohydrate and high fat meals / V.L. Bowden, R.G. McMurray // *Int J Sport Nutr Exerc Metab.* – 2000. – V. 10. – № 1. – P. 16-27.
69. Brouns, F. Eating, drinking, and cycling. A controlled Tour de France simulation study, Part I / F. Brouns, W.H. Saris, J. Stroecken, E. Beckers, R. Thijssen, N.J. Rehrer, F. ten Hoor // *International Journal of Sports Medicine.* – 1989. – V. 10. – Suppl 1. – P. 32-40.
70. Brun, J.F. Beyond the Calorie Paradigm: Taking into Account in Practice the Balance of Fat and Carbohydrate Oxidation during Exercise? / J.F. Brun, J. Myzia, E. Varlet-Marie, E. Raynaud de Mauverger, J. Mercier // *Nutrients.* – 2022. – V. 14. – № 8. – Article 1605.

71. Brunet, P. Que savez-vous du RED-S? Une étude de terrain sur les connaissances des entraîneurs sportifs [What do you know of RED-S? A field study on adolescent coaches' knowledge] / P. Brunet, A.E. Ambresin, B. Gojanovic // *Rev Med Suisse*. – 2019. – V. 15. – № 657. – P. 1334-1338.

72. Burke, L.M. Adaptation to a low carbohydrate high fat diet is rapid but impairs endurance exercise metabolism and performance despite enhanced glycogen availability / L.M. Burke, J. Whitfield, I.A. Heikura, M.L.R. Ross, N. Tee, S.F. Forbes, R. Hall, A.K.A. McKay, A.M. Walleit, A.P. Sharma // *J Physiol*. – 2021. – V. 599. – № 3. – P. 771-790.

73. Burke, L.M. Carbohydrates for training and competition / L.M. Burke, J.A. Hawley, S.H. Wong, A.E. Jeukendrup // *Journal of Sports Science*. – 2011. – V. 29. – Suppl 1. – P. 17-27.

74. Burke, L.M. Effects of short-term fat adaptation on metabolism and performance of prolonged exercise / L.M. Burke, J.A. Hawley // *Medicine and Science in Sports and Exercise*. – 2002. – V. 34. – № 9. – P. 1492-1498.

75. Burke, L.M. Energy and carbohydrate for training and recovery / L.M. Burke, A.B. Loucks, N. Broad // *J Sports Sci*. – 2006. – V. 24. – № 7. – P. 675-685.

76. Burke, L.M. Relative energy deficiency in sport in male athletes: A commentary on its presentation among selected groups of male athletes / L.M. Burke, G.L. Close, M. Mooses, J.P. Morton, A.S. Tenforde // *Int J Sport Nutr Exerc Metab*. – 2018. – V. 28. – № 4. – P. 364-374.

77. Byrne, H.K. The relationship of mode and intensity of training on resting metabolic rate in women / H.K. Byrne, J.H. Wilmore // *Int J Sport Nutr Exerc Metab*. – 2001. – V. 11. – № 1. – P. 1-14.

78. Calcagno, M. The Thermic Effect of Food: A Review / M. Calcagno, H. Kahleova, J. Alwarith, N.N. Burgess, R.A. Flores, M.L. Busta, N.D. Barnard // *J Am Coll Nutr*. – 2019. – V. 38. – № 6. – P. 547-551.

79. Campa, F. Assessment of Body Composition in Athletes: A Narrative Review of Available Methods with Special Reference to Quantitative and Qualitative

Bioimpedance Analysis / F. Campa, S. Toselli, M. Mazzilli, L.A. Gobbo, G. Coratella // *Nutrients*. – 2021. – V. 13. – № 5. – Article 1620.

80. Capling, L. Validity of dietary assessment in athletes: A systematic review / L. Capling, K.L. Beck, J.A. Gifford, G. Slater, V.M. Flood, H. O'Connor // *Nutrients*. – 2017. – V. 9. – № 12. – Article 1313.

81. Carlsson, M. Prediction of race performance of elite cross-country skiers by lean mass / M. Carlsson, T. Carlsson, D. Hammarstroem, C. Malm, M. Tonkonogi // *Int. J. Sports Physiol. Perform.* – 2014. – V. 9. – № 6. – P. 1040-1045.

82. Carr, A. Nutritional Intake in Elite Cross-Country Skiers During Two Days of Training and Competition / A. Carr, K. McGawley, A. Govus, E.P. Andersson, O.M. Shannon, S. Mattsson, A. Melin // *Int J Sport Nutr Exerc Metab.* – 2019. – V. 29. – № 3. – P. 273-281.

83. Commins, S.P. Central Leptin Regulates the UCP1 and Ob Genes in Brown and White Adipose Tissue via Dierent Beta-Adrenoceptor Subtypes / S.P. Commins, P.M. Watson, N. Levin, R.J. Beiler, T.W. Gettys // *J. Biol. Chem.* – 2000. – V. 275. – P. 33059-33067.

84. Costa, R.J. Perturbed energy balance and hydration status in ultra-endurance runners during a 24 h ultramarathon / R.J. Costa, S.K. Gill, J. Hankey, A. Wright, S. Marczak // *Br J Nutr.* – 2014. – V. 112. – № 3. – P. 428-437.

85. Cowley, M.A. Leptin Activates Anorexigenic POMC Neurons through a Neural Network in the Arcuate Nucleus / M.A. Cowley, J.L. Smart, M. Rubinstein, M.G. Cerdán, S. Diano, T.L. Horvath, R.D. Cone, M.J. Low // *Nature*. – 2001. – V. 411. – P. 480-484.

86. Da Boit, M. Fit with good fat? The role of n-3 polyunsaturated fatty acids on exercise performance / M. Da Boit, A.M. Hunter, S.R. Gray // *Metabolism*. – 2017. – V. 66. – P. 45-54.

87. Dasa, M.S. Accuracy of Tracking Devices' Ability to Assess Exercise Energy Expenditure in Professional Female Soccer Players: Implications for Quantifying Energy Availability / M.S. Dasa, O. Friberg, M. Kristoffersen, G. Pettersen, J. Sundgot-

Borgen, J.H. Rosenvinge // *Int J Environ Res Public Health*. – 2022. – V. 19. – № 8. – Article 4770.

88. De Souza, M.J. What is the evidence for a Triad-like syndrome in exercising men? / M.J. De Souza, K.J. Koltun, N.I. Williams // *Curr Opin Physiol*. – 2019. – V. 10. – P. 27-34.

89. Desbrow, B. Sports nutrition for the recreational athlete / B. Desbrow, G. Slater, G.R. Cox // *Aust J Gen Pract*. – 2020. – V. 49. – № 1-2. – P. 17-22.

90. Dong, S. Lactate and Myocardial Energy Metabolism / S. Dong, L. Qian, Z. Cheng, C. Chen, K. Wang, S. Hu, X. Zhang, T. Wu // *Front Physiol*. – 2021. – V. 12. – Article 715081.

91. Doucet, E. Evidence for the existence of adaptive thermogenesis during weight loss / E. Doucet, S. St-Pierre, N. Almeras, J.P. Despres, C. Bouchard, A. Tremblay // *Br J Nutr*. – 2001. – V. 85. – № 6. – P. 715-723.

92. Du, S. The thermic effect of food is reduced in older adults / S. Du, T. Rajjo, S. Santosa, M.D. Jensen // *Horm Metab Res*. – 2014. – V. 46. – P. 365-369.

93. Edinburgh, R.M. Skipping Breakfast Before Exercise Creates a More Negative 24-hour Energy Balance: A Randomized Controlled Trial in Healthy Physically Active Young Men / R.M. Edinburgh, A. Hengist, H.A. Smith, R.L. Travers, J.A. Betts, D. Thompson, J.P. Walhin, G.A. Wallis, D.L. Hamilton, E.J. Stevenson, K.D. Tipton, J.T. Gonzalez // *J Nutr*. – 2019. – V. 149. – № 8. – P. 1326-1334.

94. Egan, A.M. Dynamic changes in energy expenditure in response to underfeeding: a review / A.M. Egan, A.L. Collins // *Proc Nutr Soc*. – 2022. – V. 81. – № 2. – P. 199-212.

95. Elliott-Sale, K.J. Endocrine Effects of Relative Energy Deficiency in Sport / K.J. Elliott-Sale, A.S. Tenforde, A.L. Parziale, B. Holtzman, K.E. Ackerman // *Int J Sport Nutr Exerc Metab*. – 2018. – V. 28. – № 4. – P. 335-349.

96. Esteves de Oliveira, F.C. Gasto energético de adultos brasileiros saudáveis: uma comparação de métodos [Energy expenditure of healthy Brazilian adults: a comparison of methods] / F.C. Esteves de Oliveira, A.C. de Mello Cruz, C. Gonçalves

Oliveira, A.C. Rodrigues Ferreira Cruz, V. Mayumi Nakajima, J. Bressan // *Nutr Hosp.* – 2008. – V. 23. – № 6. – P. 554-561.

97. Ettema, G. Analysis of a sprint ski race and associated laboratory determinants of world-class performance / G. Ettema, H.C. Holmberg, Ø. Sandbakk // *Eur. J. Appl. Physiol.* – 2011. – V. 111. – № 6. – P. 947-957.

98. Fazeli, P.K. Determinants of GH resistance in malnutrition / P.K. Fazeli, A. Klibanski // *J Endocrinol.* – 2014. – V. 220. – № 3 – P. 57-65.

99. Frączek, B. Energy expenditure of athletes' endurance and strength in the light of the Polish energy intake standards / B. Frączek, A. Grzelak, A.T. Klimek // *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health.* – 2019. – V. 32. – № 1. – P. 1-13.

100. Fritzen, A.M. Tuning fatty acid oxidation in skeletal muscle with dietary fat and exercise / A.M. Fritzen, A.M. Lundsgaard, B. Kiens // *Nat Rev Endocrinol.* – 2020. – V. 16. – № 12. – P. 683-696.

101. Fudge, B.W. Evidence of negative energy balance using doubly labelled water in elite Kenyan endurance runners prior to competition / B.W. Fudge, K.R. Westerterp, F.K. Kiplamai, V.O. Onywera, M.K. Boit, B. Kayser, Y.P. Pitsiladis // *Br J Nutr.* – 2006. – V. 95. – № 1. – P. 59-66.

102. Gagnon, D.D. Ambient temperature influences metabolic substrate oxidation curves during running and cycling in healthy men / D.D. Gagnon, L. Perrier, S.C. Dorman, B. Oddson, C. Larivière, O. Serresse // *Eur J Sport Sci.* – 2020. – V. 20. – № 1– P. 90-99.

103. Germini, F. Accuracy and Acceptability of Wrist-Wearable Activity-Tracking Devices: Systematic Review of the Literature / F. Germini, N. Noronha, V. Borg Debono, B. Abraham Philip, D. Pete, T. Navarro, A. Keepanasseril, S. Parpia, K. de Wit, A. Iorio // *J Med Internet Res.* – 2022. – V. 24. – № 1. – e30791.

104. Glancy, B. Mitochondrial reticulum for cellular energy distribution in muscle / B. Glancy, L.M. Hartnell, D. Malide, Z.X. Yu, C.A. Combs, P.S. Connelly S. Subramaniam, R.S. Balaban // *Nature.* – 2015. – V. 523. – № 7562. – P. 617-620.

105. Gonzalez, J.T. Carbohydrate Availability as a Regulator of Energy Balance With Exercise / J.T. Gonzalez, J.A. Betts, D. Thompson // *Exerc Sport Sci Rev.* – 2019. – V. 47. – № 4. – P. 215-222.

106. Grzebisz, N. Cardiovascular Adaptations to Four Months Training in Middle-Aged Amateur Long-Distance Skiers / N. Grzebisz // *Diagnostics (Basel).* – 2020. – V. 10. – № 7. – Article 442.

107. Guebels, C.P. Active women before/after an intervention designed to restore menstrual function: resting metabolic rate and comparison of four methods to quantify energy expenditure and energy availability / C.P. Guebels, L.C. Kam, G.F. Maddalozzo, M.M. Manore // *Int J Sport Nutr Exerc Metab.* – 2014. – V. 24. – № 1. – P. 37-46.

108. Guilbert, J.J. The world health report 2002 - reducing risks, promoting healthy life / J.J. Guilbert. *Educ Health (Abingdon).* – 2003. – 230 p.

109. Hall, K.D. Energy balance and its components: implications for body weight regulation / K.D. Hall, S.B. Heymsfield, J.W. Kemnitz, S. Klein, D.A. Schoeller, J.R. Speakman // *Am. J. Clin. Nutr.* – 2012. – V. 95. – № 4. – P. 989-994.

110. Hamada, Y. The number of chews and meal duration affect diet-induced thermogenesis and splanchnic circulation / Y. Hamada, H. Kashima, N. Hayashi // *Obes Silver Spring Md.* – 2014. – V. 22. – № 5. – P. 62-69.

111. Hankinson, A.L. Maintaining a high physical activity level over 20 years and weight gain / A.L. Hankinson, M.L. Daviglius, C. Bouchard, M. Carnethon, C.E. Lewis, P.J. Schreiner, K. Liu, S. Sidney // *JAMA.* – 2010. – V. 304. – № 23. – P. 2603-2610.

112. Harriss, D.J. Standards for Ethics in Sport and Exercise Science Research: 2018 Update / D.J. Harriss, A. Macsween, G. Atkinson // *International Journal of Sports Medicine.* – 2017. – V. 38. – № 14. – P. 1126-1131.

113. Hassapidou, M.N. Dietary intakes of elite female athletes in Greece / M.N. Hassapidou, A. Manstrantoni // *J Hum Nutr Dietetics.* – 2001. – V. 14. – № 5. – P. 391-396.

114. Heikura, I. A. Energetic Demands and Nutritional Strategies of Elite Cross-Country Skiers During Tour de Ski: A Narrative Review / I.A. Heikura, O. Kettunen, I.

Garthe, H. Holmlund, S.B. Sandbakk, M. Valtonen, J.K. Ihalainen // *Journal of Science in Sport and Exercise*. – 2021. – V. 3. – № 3. – P. 224-237.

115. Henderson, G.C. Lipolysis and fatty acid metabolism in men and women during the postexercise recovery period / G.C. Henderson, J.A. Fattor, M.A. Horning, N. Faghihnia, M.L. Johnson, T.L. Mau, M. Luke-Zeitoun, G.A. Brooks // *J Physiol*. – 2007. – V. 584. – № 3. – P. 963-981.

116. Herring, J.L. Effect of suspending exercise training on resting metabolic rate in women / J.L. Herring, P.A. Mole, C.N. Meredith, J.S. Stern // *Med Sci Sports Exerc*. – 1992. – V. 24. – № 1. – P. 59-65.

117. Heydenreich, J. Total Energy Expenditure, Energy Intake, and Body Composition in Endurance Athletes Across the Training Season: A Systematic Review / J. Heydenreich, B. Kayser, Y. Schutz, K. Melzer // *Sports Med Open*. – 2017. – V. 3. – № 1. – Article 8.

118. Heymsfield, S.B. Human energy expenditure: advances in organ-tissue prediction models / S.B. Heymsfield, C.M. Peterson, B. Bourgeois, D.M. Thomas, D. Gallagher, B. Strauss, M.J. Müller, A. Bosy-Westphal // *Obes Rev*. – 2018. – V. 19. – № 9. – P. 1177-1188.

119. Hill, J.O. The Importance of Energy Balance / J.O. Hill, H.R. Wyatt, J.C. Peters // *Eur Endocrinol*. – 2013. – V. 9. – № 2. – P. 111-115.

120. Hill, R.J. Energy intake and energy expenditure in elite lightweight female rowers / R.J. Hill, P.S. Davies // *Med Sci Sports Exerc*. – 2002. – V. 34. – № 11. – P. 1823-1829.

121. Hooper, D.R. Treating exercise-associated low testosterone and its related symptoms / D.R. Hooper, A.S. Tenforde, A.C. Hackney // *Phys Sportsmed*. – 2018. – V. 46. – № 4. – P. 427-443.

122. Hopkins, M. Individual variability in compensatory eating following acute exercise in overweight and obese women / M. Hopkins, J.E. Blundell, N.A. King // *Br. J. Sports Med*. – 2014. – V. 48. – № 20. – P. 1472-1476.

123. Hulton, A.T. Energy expenditure in the Race Across America (RAAM) / A.T. Hulton, I. Lahart, K.L. Williams, R. Godfrey, S. Charlesworth, M. Wilson C. Pedlar, G. Whyte // *Int J Sports Med.* – 2010. – V. 31. – № 7. – P. 463-467.
124. Issurin, V.B. New horizons for the methodology and physiology of training periodization / V.B. Issurin // *Sports Med.* – 2010. – V. 40. – № 3. – P. 189-206.
125. Jacobs, R.A. Mitochondria express enhanced quality as well as quantity in association with aerobic fitness across recreationally active individuals up to elite athletes / R.A. Jacobs, C. Lundby // *Journal of Applied Physiology.* – 2013. – V. 114. – № 3. P. 344-350.
126. Jagim, A.R. Accuracy of Resting Metabolic Rate Prediction Equations in Athletes / A.R. Jagim, C.L. Camic, J. Kisiolek, J. Luedke, J. Erickson, M.T. Jones, J.M. Oliver // *J Strength Cond Res.* – 2018. – V. 32. – № 7. – P. 1875-1881.
127. Jagim, A.R. The Influence of Sport Nutrition Knowledge on Body Composition and Perceptions of Dietary Requirements in Collegiate Athletes / A.R. Jagim, J.B. Fields, M. Magee, C. Kerksick, J. Luedke, J. Erickson, M.T. Jones // *Nutrients.* – 2021. – V. 13. – № 7. – Article 2239.
128. Jeukendrup A., Gleeson M. *Sport Nutrition*, 3rd ed.; Human Kinetics Publishers: Champaign, IL, USA, 2019. 616 p.
129. Johannsen, D.L. Metabolic slowing with massive weight loss despite preservation of fat-free mass / D.L. Johannsen, N.D. Knuth, R. Huizenga, J.C. Rood, E. Ravussin, K.D. Hall // *J Clin Endocrinol Metab.* – 2012. – V. 97. – № 7. – P. 2489-2496.
130. Jones, P.J. Validation of doubly labeled water for measurement of caloric expenditure in collegiate swimmers / P.J. Jones, C.A. Leitch // *J Appl Physiol.* – 1993. – V. 74. – № 6. – P. 2909-2914.
131. Jones, P.P. Role of sympathetic neural activation in age- and habitual exercise-related differences in the thermic effect of food / P.P. Jones, R.E. Van Pelt, D.G. Johnson, D.R. Seals // *J Clin Endocrinol Metab.* – 2004. – V. 89. – № 10. – P. 5138-5144.
132. Jurov, I. Relationship between energy availability, energy conservation and cognitive restraint with performance measures in male endurance athletes / I. Jurov, N.

Keay, V. Hadžić, D. Spudić, S. Rauter // *J Int Soc Sports Nutr.* – 2021. – V. 18. – № 1. – Article 24.

133. Kerksick, C.M. ISSN exercise & sports nutrition review update: research & recommendations / C.M. Kerksick, C.D. Wilborn, M.D. Roberts, A. Smith-Ryan, S.M. Kleiner, R. Jäger, R. Collins, M. Cooke, J.N. Davis, E. Galvan, M. Greenwood, L.M. Lowery, R. Wildman, J. Antonio, R.B. Kreider // *J Int Soc Sports Nutr.* – 2018. – V. 15. – № 1. – Article 38.

134. Kettunen, O. Nutrition Knowledge Is Associated with Energy Availability and Carbohydrate Intake in Young Female Cross-Country Skiers / O. Kettunen, M. Heikkilä, V. Linnamo, J.K. Ihalainen // *Nutrients.* – 2021. – V. 13. – № 6. – 1769.

135. Kindblom, J.M. Plasma Osteocalcin Is Inversely Related to Fat Mass and Plasma Glucose in Elderly Swedish Men / J.M. Kindblom, C. Ohlsson, Ö. Ljunggren, M.K. Karlsson, Å. Tivesten, U. Smith, D. Mellström // *J. Bone Miner. Res.* – 2009. – V. 24. – P. 785-791.

136. Kinnunen, H. Training-induced changes in daily energy expenditure: Methodological evaluation using wrist-worn accelerometer, heart rate monitor, and doubly labeled water technique / H. Kinnunen, K. Häkkinen, M. Schumann, L. Karavirta, K.R. Westerterp, H. Kyröläinen // *PLoS One.* – 2019. – V. 14. – № 7. – e0219563.

137. Klingenberg, M. Mechanism and Evolution of the Uncoupling Protein of Brown Adipose Tissue / M. Klingenberg // *Trends Biochem. Sci.* – 1990. – V. 15. – P. 108-112.

138. Knechtle, B. Energy turnover at the Race Across America (RAAM) - a case report / B. Knechtle, A. Enggist, T. Jehle // *Int J Sports Med.* – 2005. – V. 26. – № 6. – P. 499-503.

139. Koehler, K. Low energy availability in exercising men is associated with reduced leptin and insulin but not with changes in other metabolic hormones / K. Koehler, N.R. Hoerner, J.C. Gibbs, C. Zinner, H. Braun, M.J. De Souza, W. Schaenzer // *J Sports Sci.* – 2016. – V. 34. – № 20. – P. 1921-1929.

140. Konopka, A.R. Skeletal muscle hypertrophy after aerobic exercise training / A.R. Konopka, M.P. Harber // *Exerc. Sport Sci. Rev.* – 2014. – V. 42. – № 2. – P. 53-61.

141. Kolosova, O.N. Seasonal changes in the profile of blood plasma fatty acids as a mechanism of human adaptation to the extreme conditions of the North / O.N. Kolosova, B.M. Kershengolts, N.A. Solovieva // *Arctic and Subarctic Natural Resources*. – 2023. – V. 28. – № 3. – P. 443-450.
142. Lai, Y.K. Assessment of Standing Multi-Frequency Bioimpedance Analyzer to Measure Body Composition of the Whole Body and Limbs in Elite Male Wrestlers / Y.K. Lai, C.Y. Ho, C.L. Lai, C.Y. Taun, K.C. Hsieh // *Int J Environ Res Public Health*. – 2022. – V. 19. – № 23. – Article 15807.
143. Larsson, P. Body composition and performance in cross-country skiing / P. Larsson, K. Henriksson-Larsén // *Int J Sports Med*. – 2008. – V. 29. – № 12. – P. 971-975.
144. Lee, M.G. Resting metabolic rate after endurance exercise training / M.G. Lee, D.A. Sedlock, M.G. Flynn, G.H. Kamimori // *Med Sci Sports Exerc*. – 2009. – V. 41. – № 7. – P. 1444-1451.
145. Lee, Y. PPAR is necessary for the lipopenic action of hyperleptinemia on white adipose and liver tissue. / Y. Lee, X. Yu, F. Gonzales, D.J. Mangelsdorf, M.Y. Wang, C. Richardson, L.A. Witters, R.H Unger // *Proc. Natl. Acad. Sci*. – 2002. – V. 99. – P. 11848-11853.
146. Lemmer, J.T. Effect of strength training on resting metabolic rate and physical activity: age and gender comparison / J.T. Lemmer, F.M. Ivey, A.S. Ryan, G.F. Martel, D.E. Hurlbut, J.E. Metter, J.L. Fozard, J.L. Fleg, B.F. Hurley // *Med Sci Sports Exerc*. – 2001. – V. 33. – № 4. – P. 532-541.
147. Leonard, W.R. Climatic influences on basal metabolic rates among circumpolar populations / W.R. Leonard, M.V. Sorensen, V.A. Galloway, G.J. Spencer, M.J. Mosher, L. Osipova, V.A. Spitsyn // *Am. J. Hum. Biol*. – 2002. – V. 14. – № 5. – P. 609-620.
148. Levine, J.A. Measurement of energy expenditure / J.A. Levine // *Public Health Nutr*. – 2005. – V. 8. – № 7A. – P. 1123-1132.
149. Li, S. Comparison of energy expenditure and substrate metabolism during overground and motorized treadmill running in Chinese middle-aged women / S. Li, J.J.

Xue, P. Hong, C. Song, Z.H. He // *Scientific Reports*. – 2020. – V. 10. – № 1. – Article 1815.

150. Lodge, M.T. Considerations of Low Carbohydrate Availability (LCA) to Relative Energy Deficiency in Sport (RED-S) in Female Endurance Athletes: A Narrative Review / M.T. Lodge, C.L. Ward-Ritacco, K.J. Melanson // *Nutrients*. – 2023. – V. 15. – № 20. – Article 4457.

151. Loucks, A.B. Energy availability in athletes / A.B. Loucks, B. Kiens, H.H. Wright // *Journal of Sports Sciences*. – 2011. – V. 29. – P. 7-15.

152. Loucks, A.B. Energy balance and body composition in sports and exercise / A.B. Loucks // *J Sports Sci*. – 2004. – V. 22. – № 1. – P. 1-14.

153. Loucks, A.B. Luteinizing hormone pulsatility is disrupted at a threshold of energy availability in regularly menstruating women / A.B. Loucks, J.R. Thuma // *J Clin Endocrinol Metab*. – 2003. – V. 88. – № 1. – P. 297-311.

154. Lyristakis, P. Reliability of methods to measure energy expenditure during and after resistance exercise / P. Lyristakis, N. Ball, A.J. McKune // *Appl Physiol Nutr Metab*. – 2019. – V. 44. – № 12. – P. 1276-1282.

155. Lyudinina, A.Y. Dietary and plasma blood α -linolenic acid as modulators of fat oxidation and predictors of aerobic performance / A.Y. Lyudinina, E.A. Bushmanova, N.G. Varlamova, E.R. Bojko // *J Int Soc Sports Nutr*. – 2020. – V. 17. – № 1. – Article 57.

156. Lyudinina, A.Y. Fatty acids composition and food consumption among reindeer herders and urban inhabitants of the European North of Russia / A.Y. Lyudinina, T.V. Eseva, N.N. Potolitsyna, A.A. Chernykh, E.R. Bojko // *Rural Remote Health*. – 2014. – V. 14. – № 2. – Article 2539.

157. Lyudinina, A.Yu. Priority use of medium-chain fatty acids during high-intensity exercise in cross-country skiers / A.Yu. Lyudinina, G.E. Ivankova, E.R. Bojko // *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. – 2018. – V. 15. – № 1. – Article 57.

158. MacKenzie-Shalders, K. The effect of exercise interventions on resting metabolic rate: A systematic review and meta-analysis / K. MacKenzie-Shalders, J.T.

Kelly, D. So, V.G. Coffey, N.M. Byrne // *J Sports Sci.* – 2020. – V. 38. – № 14. – P.1635-1649.

159. Maclean, P.S. Biology's response to dieting: the impetus for weight regain / P.S. Maclean, A. Bergouignan, M.A. Cornier, M.R. Jackman // *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol.* – 2011. – V. 301. – № 3. – P. 581-600.

160. Magkos, F. Methodology of dietary assessment in athletes: concepts and pitfalls / F. Magkos, M. Yannakoulia // *Curr Opin Clin Nutr Metab Care.* – 2003. – V. 6. – № 5. – P. 539-549.

161. Malsagova, K.A. Sports Nutrition: Diets, Selection Factors, Recommendations / K.A. Malsagova, A.T. Kopylov, A.A. Sinitsyna, A.A. Stepanov, A.A. Izotov, T.V. Butkova, K. Chingin, M.S. Klyuchnikov, A.L. Kaysheva // *Nutrients.* – 2021. – V. 13. – № 11. – Article 3771.

162. Marra, M. Resting energy expenditure in elite athletes: development of new predictive equations based on anthropometric variables and bioelectrical impedance analysis derived phase angle / M. Marra, O. Di Vincenzo, I. Cioffi, R. Sammarco, D. Morlino, L. Scalfi // *J Int Soc Sports Nutr.* – 2021. – V. 18. – № 1. – Article 68.

163. Martin, A. Is advice for breakfast consumption justified? Results from a short-term dietary and metabolic experiment in young healthy men / A. Martin, S. Normand, M. Sothier, J. Peyrat, C. Louche-Pelissier, M. Laville // *Br J Nutr.* – 2000. – V. 84. – № 3. – P. 337-344.

164. Martin, A. Tissue losses and metabolic adaptations both contribute to the reduction in resting metabolic rate following weight loss / A. Martin, D. Fox, C.A. Murphy, H. Hofmann, K. Koehler // *Int J Obes (Lond).* – 2022. – V. 46. – № 6. – P. 1168-1175.

165. Martin, M.K. Voluntary food intake by elite female cyclists during training and racing: influence of daily energy expenditure and body composition / M.K. Martin, D.T. Martin, G.R. Collier, L.M. Burke // *Int J Sport Nutr Exerc Metab.* – 2002. – V. 12. – № 3. – P. 249-267.

166. Martins, C. Metabolic adaptation is an illusion, only present when participants are in negative energy balance / C. Martins, J. Roekenes, S. Salamati, B.A. Gower, G.R. Hunter // *Am J Clin Nutr.* – 2020. – V. 112. – № 5. – P. 1212-1218.

167. Matveyev, L. *Periodisierung des sportlichen Trainings*. 2nd ed. Berlin: Bartels & Wernitz, 1975.

168. Maunder, E. Contextualising Maximal Fat Oxidation During Exercise: Determinants and Normative Values / E. Maunder, D.J. Plews, A.E. Kilding // *Frontiers in Physiology.* – 2018. – V. 23. – № 9. – Article 599.

169. McGilvery, R. *Biochemistry. A functional approach* / R. McGilvery, G. Goldstein. – Philadelphia: Saunders, 1983. – 909 p.

170. McNab, B.K. What determines the basal rate of metabolism? / B.K. McNab // *J Exp Biol.* – 2019. – V. 222. – Pt. 15. – jeb205591.

171. Melchiorri, G. Body composition analysis to study long-term training effects in elite male water polo athletes / G. Melchiorri, V. Viero, R. Sorge, T. Triossi, A. Campagna, S.L. Volpe, D. Lecis, V. Tancredi, A. Andreoli // *J Sports Med Phys Fitness.* – 2018. – V. 58. – № 9. – P. 1269-1274.

172. Melin, A.K. Energy availability in athletics: health, performance, and physique / A.K. Melin, I.A. Heikura, A. Tenforde, M. Mountjoy // *Int J Sport Nutr Exerc Metab.* – 2019. – V. 29. – № 2. – P. 152-164.

173. Melzer, K. Carbohydrate and fat utilization during rest and physical activity // *e-SPEN, the European e-Journal of Clinical Nutrition and Metabolism.* 2011. № 6. P. e45.

174. Minokoshi, Y. Leptin Stimulates Fatty-Acid Oxidation by Activating AMP-Activated Protein Kinase / Y. Minokoshi, Y.-B. Kim, O.D. Peroni, L.G.D. Fryer, C. Müller, D. Carling, B.B. Kahn // *Nature.* – 2002. – V. 415. – P. 339-343.

175. Mishmar, D. Natural selection shaped regional mtDNA variation in humans / D. Mishmar, E. Ruiz-Pesini, P. Golik, V. Macaulay, A.G. Clark, S. Hosseini, M. Brandon, K. Easley, E. Chen, M.D. Brown, R.I. Sukernik, A. Olckers, D.C. Wallace // *Proc Natl Acad Sci USA.* – 2003. – V. 100. № 1. – P. 171-176.

176. Monferrer-Marín, J. Comment on: "Assessment of Metabolic Flexibility by Means of Measuring Blood Lactate, Fat, and Carbohydrate Oxidation Responses to Exercise in Professional Endurance Athletes and Less-Fit Individuals"/ J. Monferrer-Marín, A. Roldán, P. Monteagudo, C. Blasco-Lafarga // *Sports Med.* – 2022. – V. 52. – № 8. – P. 2009-2010.

177. Morris, A.L. Biochemistry, Nutrients / A.L. Morris, S.S. Mohiuddin. – In: *StatPearls Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2023.* – PMID: 32119432.

178. Morrison, S.F. Central Neural Regulation of Brown Adipose Tissue Thermogenesis and Energy Expenditure / S.F. Morrison, C.J. Madden, D. Tupone // *Cell Metab.* – 2014. – V. 19. – P. 741-756.

179. Motonaga, K. Estimation of total daily energy expenditure and its components by monitoring the heart rate of Japanese endurance athletes / K. Motonaga, S. Yoshida, F. Yamagami, T. Kawano, E. Takeda // *J Nutr Sci Vitaminol (Tokyo).* – 2006. – V. 52. – № 5. – P. 360-367.

180. Mountjoy, M. International Olympic Committee (IOC) Consensus Statement on Relative Energy Deficiency in Sport (RED-S): 2018 Update / M. Mountjoy, J. Sundgot-Borgen, L. Burke, K.E. Ackerman, C. Blauwet, N. Constantini, C. Lebrun, B. Lundy, A. Melin, N. Meyer, R. Sherman, A.S. Tenforde, M.K. Torstveit, R. Budgett // *Int J Sport Nutr Exerc Metab.* – 2018. – V. 28. – № 4. – P. 316-331.

181. Muller, M.J. Adaptive thermogenesis with weight loss in humans / M.J. Muller, A. Bosy-Westphal // *Obesity (Silver Spring).* – 2013. – V. 21. – № 2. – P. 218-228.

182. Muller, M.J. Changes in energy expenditure with weight gain and weight loss in humans / M.J. Muller, J. Enderle, A. Bosy-Westphal // *Curr Obes Rep.* – 2016. – V. 5. – № 4. – P. 413-423.

183. Murphy, C. Caloric restriction induces anabolic resistance to resistance exercise / C. Murphy, K. Koehler Eur // *J Appl Physiol.* – 2020. – V. 120. – № 5. – P. 1155-1164.

184. Nagai, N. Metabolic responses to high-fat or low-fat meals and association with sympathetic nervous system activity in healthy young men / N. Nagai, N. Sakane, T. Moritani // *J Nutr Sci Vitaminol (Tokyo)*. – 2005. – V. 51. – № 5. – P. 3553-3560.
185. Nattiv, A. American College of Sports Medicine position stand. The female athlete triad / A. Nattiv, A.B. Loucks, M.M. Manore, C.F. Sanborn, J. Sundgot-Borgen, M.P. Warren; American College of Sports Medicine // *Med Sci Sports Exerc.* – 2007. – V. 39. – № 10. – P. 1867-1882.
186. Nieman, D.C. Current and Novel Reviews in Sports Nutrition / D.C. Nieman // *Nutrients*. – 2021. – V. 13. – № 8. – Article 2549.
187. Nikanorova, A.A. The Role of Leptin Levels in Adaptation to Cold Climates / A.A. Nikanorova, N.A. Barashkov, S.S. Nakhodkin, V.G. Pshennikova, A.V. Solovyev, G.P. Romanov, S.A Fedorova // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2020. – V. 17. – № 6. – Article 1854.
188. Nunes, C.L. Adaptive thermogenesis after moderate weight loss: magnitude and methodological issues / C.L. Nunes, F. Jesus, R. Francisco, C.N. Matias, M. Heo, S.B. Heymsfield, A. Bosy-Westphal, L.B. Sardinha, P. Martins, C.S. Minderico, A.M. Silva // *Eur J Nutr.* – 2021. – V. 27. – № 2. – P. 1405-1416.
189. Ocobock, C. Elevated resting metabolic rates among female, but not male, reindeer herders from subarctic Finland / C. Ocobock, P. Soppela, M.T. Turunen, V. Stenbäck, K.H. Herzig // *Am J Hum Biol.* – 2020. – V. 32. № 6. – e23432.
190. O'Connor, H. *Losing, gaining and making weight for athletes* / H. O'Connor, G. Slater. – West Sussex: Wiley-Blackwell, 2011. – 385 p.
191. Ousley-Pahnke, L. Dietary intake and energy expenditure of female collegiate swimmers during decreased training prior to competition // L. Ousley-Pahnke, D.R. Black, R.J. Gretebeck // *J Am Diet Assoc.* – 2001. – V. 101. – № 3. – P. 351-354.
192. Papadopoulou, S.K. Body composition and dietary intake of elite cross-country skiers members of the greek national team / S.K. Papadopoulou, A. Gouvianaki, M.G. Grammatikopoulou, Z. Maraki, I.G. Pagkalos, N. Malliaropoulos, M.N. Hassapidou, N. Maffulli // *Asian J Sports Med.* – 2012. – V. 3. – № 4. – P. 257-266.

193. Papageorgiou, M. Effects of reduced energy availability on bone metabolism in women and men / M. Papageorgiou, K.J. Elliott-Sale, A. Parsons, J.C.Y. Tang, J.P. Greeves, W.D. Fraser, C. Sale // *Bone*. – 2017. – V. 105. – P. 191-199.

194. Park, J. Estimating free-living human energy expenditure: practical aspects of the doubly labeled water method and its applications / J. Park, I.T. Kazuko, E. Kim, J. Kim, J. Yoon // *Nutr Res Pract*. – 2014. – V. 8. – P. 241-248.

195. Peñailillo, L. Energy expenditure and substrate oxidation during and after eccentric cycling / L. Peñailillo, A. Blazevich, K. Nosaka // *Eur. J. Appl. Physiol*. – 2014. – V. 114. – № 4. P. – 805-814.

196. Plasqui, G. Assessment of Total Energy Expenditure and Physical Activity Using Activity Monitors / G. Plasqui // *J Nutr Sci Vitaminol (Tokyo)*. – 2022. – V. 68. – Suppl 1. – P. 49-51.

197. Plasqui, G. Seasonal variation in sleeping metabolic rate, thyroid activity, and leptin / G. Plasqui, A.D. Kester, K.R. Westerterp // *Am J Physiol Endocrinol Metab*. – 2003. – V. 285. – № 2. – P. 338-343.

198. Polat, M. Seasonal variations in body composition, maximal oxygen uptake, and gas exchange threshold in cross-country skiers / M. Polat, S. Korkmaz Eryilmaz, S. Aydoğan // *Open Access J Sports Med*. – 2018. – V. 9. – P. 91-97.

199. Prat-Larquemin, L. Sweet taste of aspartame and sucrose: effects on diet-induced thermogenesis / L. Prat-Larquemin, J.M. Oppert, F. Bellisle, B. Guy-Grand // *Appetite*. – 2000. – V. 34. – № 3. – P. 245-251.

200. Psota, T. Measuring energy expenditure in clinical populations: rewards and challenges / T. Psota, K.Y. Chen // *Eur J Clin Nutr*. – 2013. – V. 67. – № 5. – P. 436-442.

201. Purcell, S.A. Accuracy and reliability of a portable indirect calorimeter compared to whole-body indirect calorimetry for measuring resting energy expenditure / S.A. Purcell, C. Johnson-Stoklossa, J.R. Braga Tibaes, A. Frankish, S.A. Elliott, R. Padwal, C.M. Prado // *Clin Nutr ESPEN*. – 2020. – V. 39. – P. 67-73.

202. Quatela, A. The energy content and composition of meals consumed after an overnight fast and their effects on diet induced thermogenesis: a systematic review, meta-

analyses and meta-regressions / A. Quatela, R. Callister, A. Patterson, L. MacDonald-Wicks // *Nutrients*. – 2016. – V. 8. – № 11. – Article 670.

203. Roberts, D.F. Basal metabolism, race, and climate / D.F. Roberts // *J. R. Anthropol. Inst.* – 1952. – V. 82. – P. 169-183.

204. Rodriquez, N.R. Position of the American Dietetic Association, Dietitians of Canada, and the American College of Sports Medicine: Nutrition and athletic performance / N.R. Rodriquez, N.M. DiMarco, S. Langley // *J. Am. Diet. Assoc.* – 2009 – V. 3. – № 11. – 109. – P. 509-527.

205. Rømer, T. The relationship between peak fat oxidation and prolonged double-poling endurance exercise performance / T. Rømer, M. Thunestvedt Hansen, J. Frandsen, S. Larsen, F. Dela, J. Wulff Helge // *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*. – 2020. – V. 30. – № 11. – P. 2044-2056.

206. Rosenbloom, C.A. Nutrition knowledge of collegiate athletes in a Division I National Collegiate Athletic Association institution / C.A. Rosenbloom, S.S. Jonnalagadda, R. Skinner // *Journal of the American Dietetic Association*. – 2002. – V. 102. – № 3. – P. 418-420.

207. Ruddick-Collins, L.C. Circadian Rhythms in Resting Metabolic Rate Account for Apparent Daily Rhythms in the Thermic Effect of Food / L.C. Ruddick-Collins, A. Flanagan, J.D. Johnston, P.J. Morgan, A.M. Johnstone // *J Clin Endocrinol Metab.* – 2022. – V. 107. – № 2. – P. 708-715.

208. Ruff, C.B. Climate and body shape in human evolution / C.B. Ruff // *J. Hum. Evol.* – 1991. – V. 21. – P. 81-105.

209. Ruiz-Pesini, E. Effects of purifying and adaptive selection on regional variation in human mtDNA / E. Ruiz-Pesini, D. Mishmar, M. Brandon, V. Procaccio, D.C. Wallace // *Science*. – 2004. – V. 303. – № 5655. – P. 223-226.

210. San-Millán, I. Assessment of Metabolic Flexibility by Means of Measuring Blood Lactate, Fat, and Carbohydrate Oxidation Responses to Exercise in Professional Endurance Athletes and Less-Fit Individuals / I. San-Millán, G.A. Brooks // *Sports Med.* – 2018. – V. 48. – № 2. – P. 467-479.

211. Santos, D.A. Reference values for body composition and anthropometric measurements in athletes / D.A. Santos, J.A. Dawson, C.N. Matias, P.M. Rocha, C.S. Minderico, D.B. Allison, L.B. Sardinha, A.M. Silva // *PLoS One*. – 2014. – V. 9. – № 5. – Article e97846.
212. Saris, W.H. Study on food intake and energy expenditure during extreme sustained exercise: the Tour de France / W.H. Saris, M.A. van Erp-Baart, F. Brouns, K.R. Westerterp, F. ten Hoor // *Int J Sports Med*. – 1989. – V. 10. – Suppl. 1. – P. 26-31.
213. Schofield, K.L. Resting metabolic rate prediction equations and the validity to assess energy deficiency in the athlete population / K.L. Schofield, H. Thorpe, S.T. Sims // *Exp Physiol*. – 2019. – V. 104. – № 4. – P. 469-475.
214. Schulz, L.O. Energy expenditure of elite female runners measured by respiratory chamber and doubly labeled water / L.O. Schulz, S. Alger, I. Harper, J.H. Wilmore, E. Ravussin // *J Appl Physiol*. – 1992. – V. 72. – № 1. – P. 23-28.
215. Schwellnus, M.P. *The Olympic Textbook of Medicine in Sport* / M.P. Schwellnus. – IOC: Wiley-Blackwell, 2011. – 624 p.
216. Shetty, P.S. Human energy requirements. Scientific background papers from the Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation / P.S. Shetty // *Public Health Nutrition*. – 2005. – V. 8. – № 7A. – P. 929-1228.
217. Siedler, M.R. The Influence of Energy Balance and Availability on Resting Metabolic Rate: Implications for Assessment and Future Research Directions / M.R. Siedler, M.J. De Souza, K. Albracht-Schulte, Y. Sekiguchi, G.M. Tinsley // *Sports Med*. – 2023. – V. 53. – № 8. – P. 1507-1526.
218. Silva, A.M. Energy Balance over One Athletic Season / A.M. Silva, C.N. Matias, D.A. Santos, D. Thomas, A. Bosy-Westphal, M.J. Müller, S.B. Heymsfield, L.B. Sardinha // *Med Sci Sports Exerc*. – 2017. – V. 49. – № 8. – P. 1724-1733.
219. Sim, A. Review: questionnaires as measures for low energy availability (LEA) and relative energy deficiency in sport (RED-S) in athletes / A. Sim, S.F. Burns // *J Eat Disord*. – 2021. – V. 9. – № 1. – Article 41.

220. Sjodin, A.M. Energy balance in cross-country skiers: a study using doubly labeled water / A.M. Sjödin, A.B. Andersson, J.M. Högberg, K.R. Westerterp // *Med Sci Sports Exerc.* – 1994. – V. 26. – № 6. – P. 720-724.

221. Skulachev, V.P. Anion Carriers in Fatty Acid-Mediated Physiological Uncoupling / V.P. Skulachev // *J. Bioenerg. Biomembr.* – 1999. – V. 31. – P. 431-445.

222. Snodgrass, J.J. Basal metabolic rate in the Yakut (Sakha) of Siberia / J.J. Snodgrass, W.R. Leonard, L.A. Tarskaia, V.P. Alekseev, V.G. Krivoschapkin // *Am. J. Hum. Biol.* – 2005. – V. 17. – № 2. – P. 155-172.

223. Soares, M.J. Resting energy expenditure and body composition: critical aspects for clinical nutrition / M.J. Soares, M.J. Müller // *Eur J Clin Nutr.* – 2018. – V. 72. – № 9. – P. 1208-1214.

224. Staal, S. Low RMRratio as a surrogate marker for energy deficiency, the choice of predictive equation vital for correctly identifying male and female ballet dancers at risk / S. Staal, A. Sjödin, I. Fahrenholtz, K. Bonnesen, A.K. Melin // *Int J Sport Nutr Exerc Metab.* – 2018. – V. 28. – № 4. – P. 412-418.

225. Steegmann, A.T. Human cold adaptation: an unfinished agenda / A.T. Steegmann // *Am. J. Hum. Biol.* – 2007. – V. 19. – № 2. – P. 218-227.

226. Stellingwerff, T. Nutrition for power sports: middledistance running, track cycling, rowing, canoeing/kayaking, and swimming / T. Stellingwerff, R.J. Maughan, L.M. Burke // *J Sports Sci.* – 2011. – V. 29. – Suppl 1. – P. 79-89.

227. Stellingwerff, T. Nutritional strategies to optimize training and racing in middle-distance athletes / T. Stellingwerff, M.K. Boit, P.T. Res // *J Sports Sci.* – 2007. – V. 25. – Suppl 1. – P. 17-28.

228. Stenbäck, V. Step detection and energy expenditure at different speeds by three accelerometers in a controlled environment / V. Stenbäck, J. Leppäluoto, N. Leskelä, L. Viitala, E. Vihriälä, D. Gagnon, M. Tulppo, K.H. Herzig // *Sci Rep.* – 2021. – V. 11. – № 1. – Article 20005.

229. Sterringer, T. RMR Ratio as a Surrogate Marker for Low Energy Availability / T. Sterringer, D E. Larson-Meyer // *Curr Nutr Rep.* – 2022. – V. 11. – № 2. – P. 263-272.

230. Strock, N.C.A. Indices of resting metabolic rate accurately reflect energy deficiency in exercising women / N.C.A. Strock, K.J. Koltun, E.A. Southmayd, N.I. Williams, M.J. de Souza // *Int J Sport Nutr Exerc Metab.* – 2020. – V. 30. – № 1. – P. 14-24.
231. Sundgot-Borgen, J. How to minimise the health risks to athletes who compete in weight-sensitive sports review and position statement on behalf of the Ad Hoc Research Working Group on Body Composition, Health and Performance, under the auspices of the IOC Medical Commission / J. Sundgot-Borgen, N.L. Meyer, T.G. Lohman, T.R. Ackland, R.J. Maughan, A.D. Stewart, W. Müller // *Br J Sports Med.* – 2013. – V. 47. – № 16. – P. 1012-1022.
232. Suyila, Q. Serum Leptin Concentrations in Mongolian Women / Q. Suyila, H. Cui, L. Yang, L. Zhao, R. Zhang, X. Su // *Obes. Res. Clin. Pract.* – 2013. – № 7. – P. 75-80.
233. Taguchi, M. Reexamining the calculations of exercise energy expenditure in the energy availability equation of free-living athletes / M. Taguchi, M.M. Manore // *Front Sports Act Living.* – 2022. – V. 4. – Article 885631.
234. Tareen, S.H. Logical modelling reveals the PDC-PDK interaction as the regulatory switch driving metabolic flexibility at the cellular level / S.H. Tareen, M. Kutmon, I.C. Arts, T.M. de Kok, C.T. Evelo, M.E. Adriaens // *Genes Nutr.* – 2019. – V. 14. – Article 27.
235. Tenforde, A.S. Parallels with the female athlete triad in male athletes / A.S. Tenforde, M.T. Barrack, A. Nattiv, M. Fredericson // *Sport Med.* – 2016. – V. 46. – P. 171-182.
236. Thielecke, F. Omega-3 Fatty Acids for Sport Performance-Are They Equally Beneficial for Athletes and Amateurs? A Narrative Review / F. Thielecke, A. Blannin // *Nutrients.* – 2020. – V. 12. – № 12. – Article 3712.
237. Thomas, D.T. American College of Sports Medicine joint position statement. Nutrition and athletic performance / D.T. Thomas, K.A. Erdman, L.M. Burke // *Med Sci Sports Exerc.* – 2016. – V. 48. – № 3. – P. 543-568.

238. Thyfault, J.P. Postprandial metabolism in resistance-trained versus sedentary males / J.P. Thyfault, S.R. Richmond, M.J. Carper, J.A. Potteiger, M.W. Hulver // *Med Sci Sports Exerc.* – 2004. – V. 36. – № 4. – P. 709-716.

239. Trappe, T.A. Energy expenditure of swimmers during high volume training / T.A. Trappe, A. Gastaldelli, A.C. Jozsi, J.P. Troup, R.R. Wolfe // *Med Sci Sports Exerc.* – 1997. – V. 29. – № 7. – P. 950-954.

240. Udebake, V. Comparison of Physiological and Perceptual Responses to Upper-, Lower-, and Whole-Body Exercise in Elite Cross-Country Skiers / V. Udebake, J. Berg, A. Tjonna, Ø. Sandbakk // *J. Strength Cond. Res.* – 2019. – V. 33. – № 4. – P. 1086-1094.

241. Vallerand, A.L. Rates of energy substrates utilization during human cold exposure / A.L. Vallerand, I. Jacobs // *Eur. J. Appl. Physiol.* – 1989. – V. 58. – № 8. – P. 873-878.

242. Viner, R.T. Energy availability and dietary patterns of adult male and female competitive cyclists with lower than expected bone mineral density / R.T. Viner, M. Harris, J.R. Berning, N.L. Meyer // *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* – 2015. – V. 25. – № 6. – P. 594-602.

243. Vitale, K. Nutrition and Supplement Update for the Endurance Athlete: Review and Recommendations / K. Vitale, A. Getzin // *Nutrients.* – 2019. – V. 11. – № 6. – Article 1289.

244. Voss, S.C. The effect of cumulative endurance exercise on leptin and adiponectin and their role as markers to monitor training load / S.C. Voss, Z. Nikolovski, P.C. Bourdon, M. Alsayrafi, Y.O. Schumacher // *Biol Sport.* – 2016. – V. 33. – № 1. – P. 23-28.

245. Wasserfurth, P. Reasons for and Consequences of Low Energy Availability in Female and Male Athletes: Social Environment, Adaptations, and Prevention / P. Wasserfurth, J. Palmowski, A. Hahn, K. Krüger // *Sports Med Open.* – 2020. – V. 6. – № 1. – Article 44.

246. Westerterp, K.R. Physical activity and physical activity induced energy expenditure in humans: measurement, determinants, and effects / K.R. Westerterp // *Front Physiol.* – 2013. – V. 4. – Article 90.

247. Westerterp-Plantenga, M.S. Dietary protein, weight loss, and weight maintenance / M.S. Westerterp-Plantenga, A. Nieuwenhuizen, D. Tomé, S. Soenen, K.R. Westerterp // *Annu Rev Nutr.* – 2009. – V. 29. P. 21–41.

248. William, R. Metabolic Adaptation in Indigenous Siberian Populations / R. William, J. Leonard, J. Snodgrass, M.V. Sorensen // *Annual Review of Anthropology.* – 2005. – V. 34. – P. 451-495.

249. Woods, A.L. The effects of intensified training on resting metabolic rate (RMR), body composition and performance in trained cyclists / A.L. Woods, A.J. Rice, L.A. Garvican-Lewis, A.M. Wallett, B. Lundy, M.A. Rogers, M. Welvaert, S. Halson, A. McKune, K.G. Thompson // *PLoS ONE.* – 2018. – V. 13. – № 2. – Article e0191644.

250. Yamada, A.K. Mechanotransduction pathways in skeletal muscle hypertrophy / A.K. Yamada, R. Verlengia, C.R. Bueno Junior // *J Recept Signal Transduct Res.* – 2012. – V. 32. – № 1. – P. 42-44.

251. Yang, W.H. Energetic Contributions Including Gender Differences and Metabolic Flexibility in the General Population and Athletes / W.H. Yang, J.H. Park, S.Y. Park, Y. Park // *Metabolites.* – 2022. – V. 12. – № 10. – Article 965.

252. Zusman, O. Predictive equations versus measured energy expenditure by indirect calorimetry: A retrospective validation / O. Zusman, I. Kagan, I. Bendavid, M. Theilla, J. Cohen, P. Singer // *Clin Nutr.* – 2018. – V. 38. – № 3. – P. 1206-1210.