

УДК [612.512+577.121]:796.92

ЭНЕРГОТРАТЫ В ПОКОЕ И ПРИ НАГРУЗКЕ СУБМАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ: НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ФИЗИЧЕСКОЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЛЫЖНИКОВ-ГОНЩИКОВ

© 2023 г. Е. А. Бушманова¹, *, А. Ю. Людина¹, **

¹Институт физиологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Республика Коми, Сыктывкар, Россия

*E-mail: katerinabushmanova@mail.ru

**E-mail: salu_06@inbox.ru

Поступила в редакцию 16.01.2023 г.

После доработки 07.03.2023 г.

Принята к публикации 10.05.2023 г.

Цель данного исследования заключалась в анализе энерготрат покоя (ЭТП) и энерготрат при субмаксимальной физической нагрузке у спортсменов. Проведен ретроспективный анализ данных с 2014 по 2020 гг. среди лыжников-гонщиков. По результатам тестирования в зависимости от способности преодолеть порог анаэробного обмена (ПАНО) спортсмены ($n = 136$) были разделены на две группы: I – завершили тест до ПАНО, II – выполнили тест “до отказа”. В исследование включены полученные данные только до ПАНО для корректного сравнения результатов. В I группе ЭТП составили 2058.5 ± 220.5 ккал/сут, в II группе – 2023.1 ± 216.4 ккал/сут ($p = 0.481$) при достоверном различии дыхательного коэффициента ($p < 0.000$). В структуре ЭТП вклад жиров и углеводов (Угл) в I группе составил 69 и 31%, в II группе – 48 ($p = 0.021$) и 52% ($p < 0.000$) соответственно. Выявлены корреляционные связи между фоновым потреблением кислорода и ЭТП, а также скоростью окисления жиров и Угл в состоянии покоя. При этом между группами различалось потребление кислорода на ПАНО ($p < 0.000$) и относительное значение максимального потребления кислорода (МПК) ($p < 0.05$). Энерготраты до ПАНО составили 135.9 ± 31.2 и 134.0 ± 23.4 ккал ($p = 0.399$) для I и II групп. Количество жиров и Угл, потраченное за тест до ПАНО, в группе I составило 6.3 ± 2.0 и 20.7 ± 4.4 г, в группе II – 7.1 ± 1.7 ($p < 0.05$) и 15.8 ± 5.9 ($p < 0.000$) г. Данное исследование показало, что соотношение жиров и Угл в структуре ЭТП 1 : 1 является более информативным маркером физической работоспособности, чем количественная оценка энерготрат. Сниженное значение потребления кислорода на ПАНО более чем на 20% относительно МПК может свидетельствовать об экономизации функциональных резервов и возможности организма выполнять физическую нагрузку в течение длительного времени, в том числе и в анаэробном режиме. У спортсменов, выполнивших тестирование “до отказа”, в структуре энерготрат при физической нагрузке субмаксимальной мощности происходит экономизация Угл на фоне активного использования жиров. Именно поэтому в изучение функционального состояния спортсменов следует активно вовлекать сочетанную оценку показателей физической работоспособности и энерготрат с учетом вклада Угл и жиров.

Ключевые слова: энерготраты покоя, энерготраты физической нагрузки, субмаксимальная нагрузка, физическая работоспособность, вклад жиров и углеводов, выносливые спортсмены, лыжники-гонщики.

DOI: 10.31857/S0131164623600015, **EDN:** XOMIOG

В структуре энерготрат (ЭТ) человека выделяют три основных компонента: энерготраты покоя (ЭТП) (~60–70%), пищевой термогенез (~10%) и энерготраты, связанные с физической активностью (ЭТФА) (~20–40%) [1–4]. У спортсменов процентное соотношение компонентов ЭТ изменяется в силу специфики спортивной деятельности и проявляется в снижении ЭТП до 50% [1, 5] в основном за счет увеличения ЭТФА, которые могут достигать 75–80% [3]. Поскольку ЭТП вносят основной вклад в ЭТ, измерение и интер-

претация ЭТП являются важной составляющей эффективного тренировочного процесса [6]. Известно, что ЭТФА являются наиболее изменчивым компонентом, который варьируется в зависимости от пола, возраста, особенностей вида спорта, тренировочного этапа, продолжительности и интенсивности физической нагрузки (ФН) [6–8].

Для оценки уровня физической работоспособности (ФР) и готовности спортсменов к соревновательным нагрузкам используют тесты с максимальной или субмаксимальной мощностью

Таблица 1. Антропометрические и физиологические показатели обследуемых лыжников-гонщиков ($M \pm SD$)

Показатель	Группа I ($n = 28$)	Группа II ($n = 108$)
Возраст, лет	21.4 \pm 5.4	20.9 \pm 4.7
Рост, см	177.6 \pm 4.6	177.2 \pm 5.4
Масса тела, кг	71.1 \pm 5.3	70.2 \pm 5.8
Индекс массы тела, кг/м ²	22.5 \pm 1.2	22.3 \pm 1.5
Доля жира, %	12.0 \pm 3.9	9.9 \pm 4.0*
МПК, л/мин	4.1 \pm 0.5	4.3 \pm 0.5
МПК/кг, мл/мин/кг	57.9 \pm 6.7	61.2 \pm 5.9*
РВС 170, Вт	284.1 \pm 42.2	283.8 \pm 46.7
ЧСС _{max} , уд./мин	173.1 \pm 17.0	183.1 \pm 10.2*

Примечание: * – установлены статистически значимые отличия ($p < 0.05$). МПК – максимальное потребление кислорода, ЧСС_{max} – максимальная частота сердечных сокращений. Группа I – спортсмены, которые завершили тест до порога анаэробного обмена (ПАНО), группа II – спортсмены, которые выполнили тест “до отказа”, перешли ПАНО.

нагрузки. К информативным показателям ФР относят: максимальное потребление кислорода (МПК), потребление кислорода на пороге анаэробного обмена (ПК ПАНО) и мощность выполненной нагрузки, которые имеют высокую степень корреляции с результативностью [2].

Однако большинство исследователей, оценивающих ФР и аэробную работоспособность (АР), ориентируются только на величину МПК. Ранее было показано, что в качестве перспективного надежного маркера АР можно использовать показатель максимальной скорости окисления жира (СОЖ_{max}) [9, 10]. Так же ключевым параметром аэробных возможностей организма считается уровень порога анаэробного обмена (ПАНО), по которому можно оценить переключение энергетического обмена и уровень подготовленности спортсмена. При ступенчато возрастающей ФН субмаксимальной мощности предиктором переключения энергетического обмена с аэробного на анаэробный также является индивидуальная пороговая мощность ФН. Переход в анаэробную зону характеризуется развитием метаболического ацидоза на фоне кислородного долга, что отражается на физиологических показателях и, вероятно, на значениях ЭТ.

В доступной литературе нами найдены показатели, взаимосвязанные с ЭТФА у здоровых мужчин, такие как частота сердечных сокращений (ЧСС), масса тела, пол, возраст, интенсивность ФН и индекс массы тела (ИМТ) [11]. Наиболее значимыми из них у элитных спортсменов являются масса тела, безжировая масса тела (БМТ) [11, 12]. Однако, практически отсутствуют данные о том, как соотносятся ЭТ и вклад основных энергетических макронутриентов (жиров и углеводов) с валидными показателями ФР у спортсменов, тренирующих выносливость. Поэтому целью настоящего исследования был анализ энер-

готрат покоя и энерготрат при субмаксимальной физической нагрузке в зависимости от способности высококвалифицированных лыжников-гонщиков преодолеть ПАНО.

МЕТОДИКА

В настоящем исследовании ретроспективно проанализировали данные подготовительной фазы тренировочного цикла (июнь, июль, август, сентябрь), собранные в период с 2014 по 2020 гг., среди спортсменов мужчин, занимающихся циклическим видом спорта – лыжные гонки (табл. 1). Все спортсмены являлись членами сборной команды Республики Коми по лыжным гонкам, часть из которых входит в сборную России. Спортивная квалификация спортсменов – мастера спорта международного класса (МСМК, 2%), мастера спорта (МС, 50%), кандидаты в мастера спорта (КМС, 23%) и перворазрядники (25%).

Исходная группа спортсменов ($n = 136$) была поделена в зависимости от способности спортсменов преодолеть ПАНО по результатам тестирования на две группы (рис. 1): I ($n = 28$) – спортсмены, которые завершили тест только до ПАНО, II ($n = 108$) – спортсмены, которые выполнили тест “до отказа”, перешли ПАНО. Для корректного сравнения полученных результатов среди групп в исследование включали данные до ПАНО по группе II. Остановка теста в случае группы I была связана с отказом спортсмена от продолжения пробы или с невозможностью удерживать спортсменом скорость педалирования. Разделение по спортивной квалификации в группах было равнозначным.

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-



Рис. 1. Дизайн исследования.
ЭТП – энерготраты покоя, ПАНО – порог анаэробного обмена.

стороны центральной нервной системы, такие как нарушение координации движений, головокружение, бледность, тошнота) и электрокардиографическим причинам.

Критериями допуска к исследованию являлись возраст (от 18 до 33 лет) и отсутствие вредных привычек, острых и хронических заболеваний, признаков ОРВИ. Все лыжники находились под руководством тренера и следовали спортивным режимам тренировок, характерным для их соответствующего вида спорта [13].

Энерготраты покоя (ЭТП). Исследование ЭТП проводили методом не прямой калориметрии с помощью эргоспирометрической системы “Oxycan Pro” (Jaeger, Германия) с регистрацией концентрации потребляемого O_2 , выдыхаемого CO_2 , дыхательного коэффициента (ДК), а также определением скорости окисления метаболических субстратов (углеводов, жиров) с помощью индивидуальной лицевой маски.

Участникам накануне исследования было рекомендовано ограничить тяжелые ФН и поздний ужин, а также воздержаться от кофеина. Исследование проводили утром, после 8-часового сна и стандартизированного низкокалорийного углеводного завтрака [14], в состоянии полного физи-

ческого покоя и отсутствия каких-либо внешних раздражителей в полутемной тихой комнате при комфортной температуре ($23^{\circ}C$). Обследуемого помещали на кушетку, предварительно закрепив на его лице маску. Затем, участникам давали время для адаптации (10 мин), чтобы успокоиться и освоиться. После нормализации значений ДК ($0.8-0.86$), проводили измерение в течение 10–15 мин.

Энерготраты во время велоэргометрического тестирования. Участники выполняли тест со ступенчато увеличивающейся нагрузкой на велоэргометре (Ergoline, Германия) для определения ЭТ, МПК, ДК, ЧСС методом не прямой калориметрии (Oxycan Pro, Jaeger, Германия), как было описано ранее [15]. Вентиляционные параметры усреднялись каждые 15 с. Процедура тестирования включала этапы: покой сидя (2 мин), педальирование без нагрузки (1 мин) и затем ступенчато увеличивающаяся нагрузка (начиная со 120 Вт с шагом 40 Вт каждые 2 мин). Скорость вращения педалей поддерживали на уровне 60 оборотов в минуту. Критериями достижения МПК являлись прекращение прироста показателей потребляемого кислорода, резкое увеличение легочной вен-

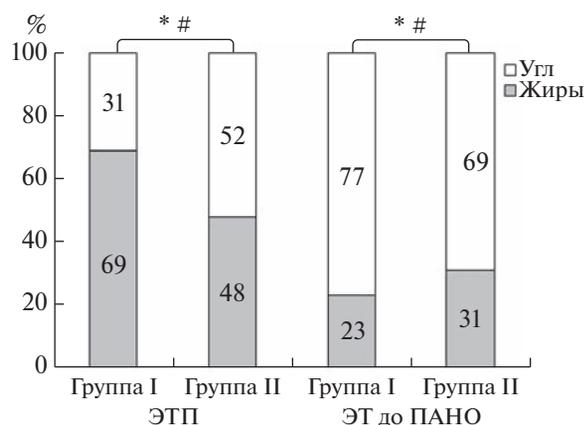


Рис. 2. Относительный вклад основных энергетических субстратов в энерготраты покоя (ЭТП) и энерготраты до порога анаэробного обмена (ПАНО) среди обследуемых групп спортсменов.

ЭТ до ПАНО – энерготраты в тесте до порога анаэробного обмена; Угл – углеводы; установлены статистически значимые отличия между группами: * – $p < 0.05$ по жирам, # – $p < 0.001$ по углеводам. Группа I – спортсмены, которые завершили тест до ПАНО, группа II – спортсмены, которые выполнили тест “до отказа”, перешли ПАНО.

тиляции и ДК. Переход в анаэробную зону регистрировали по значению ДК выше 1.02.

Вклад макронутриентов в энерготраты. Процентный вклад макронутриентов в ЭТП рассчитывали по уравнению [16]:

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

$$\% \text{ Углеводов} = ((\text{ДК} - 0.71)/0.29) \times 100. \quad (2)$$

Оценка ЭТ и расхода макронутриентов во время велоэргометрического тестирования и их процентный вклад производили с помощью разработанной нами программы “Оценка энерготрат и вклада макронутриентов в физическую работоспособность в тесте “до отказа” на системе *Oxycan Pro*” (№ ГР2022613491 от 21.03.2022).

Статистические методы исследования. Данные были обработаны в программе *Statistica* (версия 12.6, *StatSoft Inc*, 2015). Результаты представлены в

виде $M \pm SD$. Значимость различий между показателями оценивали с помощью непараметрического критерия Манна-Уитни. Корреляционный анализ проводили при помощи коэффициента ранговой корреляции Спирмена. Различия считали статистически значимыми при $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Значения ЭТП в двух группах значимо не отличались ($p = 0.481$) при достоверном 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% ($p < 0.000$) при сравнении групп (рис. 2). В структуре ЭТ теста до ПАНО отмечено достоверное увеличение доли жиров, 23 против 31% ($p < 0.05$) и снижение доли Угл 77 против 69% ($p < 0.000$) при сравнении групп.

У двух групп $VO_{2\text{фон}}$ значимо не отличалось ($p = 0.754$) и составило в I группе – 0.44 ± 0.0 л, в II группе – 0.47 ± 0.3 л. При этом выявлены корреляционные связи между $VO_{2\text{фон}}$ и ЭТП, а также скоростью окисления Угл и жиров в состоянии покоя (табл. 2).

Средняя выходная мощность (*PWC 170*) составила 287.1 ± 42.2 и 287.80 ± 46.7 Вт для I и II групп соответственно ($p = 0.946$). При этом различалось ПК ПАНО ($p < 0.000$), которое для I группы было 4.0 ± 0.5 л, для II группы – 3.4 ± 0.6 л. Значимых отличий в абсолютных значениях МПК не было обнаружено ($p = 0.094$) и составило 4.1 ± 0.5 и 4.3 ± 0.5 л для I и II групп соответственно, при этом 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 ($p < 0.05$).

Для корректного сравнения ЭТ во время тестирования в II группе также проведен анализ ЭТ до ПАНО (табл. 3), который не показал значимых отличий между группами ($p = 0.399$), при этом расход основных макронутриентов за тест значимо отличался.

Таблица 2. Корреляционные взаимосвязи между фоновым потреблением кислорода и показателями энергообмена в покое

Показатель	Группа I (n = 28)	Группа II (n = 108)
	$VO_{2\text{фон}}$	
ЭТП, ккал/сут	$p = 0.015$; $R_s = 0.4$	$p = 0.000$; $R_s = 0.4$
СОЖ, г/мин	$p = 0.037$; $R_s = 0.4$	$p = 0.010$; $R_s = 0.2$
СОУгл, г/мин	$p = 0.010$; $R_s = -0.2$	$p = 0.008$; $R_s = 0.2$

Примечание: ЭТП – энерготраты покоя; СОЖ – скорость окисления жиров; СОУгл – скорость окисления углеводов, $VO_{2\text{фон}}$ – фоновое потребление кислорода. Группа I – спортсмены, которые завершили тест до порога анаэробного обмена (ПАНО), группа II – спортсмены, которые выполнили тест “до отказа”, перешли ПАНО.

Таблица 3. Энерготраты обследуемых лыжников-гонщиков во время велоэргометрического теста у обеих групп до порога анаэробного обмена (ПАНО) ($M \pm SD$)

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: * – $p < 0.05$; *** – $p < 0.001$. Группа I – спортсмены, которые завершили тест до ПАНО, группа II – спортсмены, которые выполнили тест “до отказа”, перешли ПАНО.

Таблица 4. Корреляционные взаимосвязи между энерготратами за тест до порога анаэробного обмена (ПАНО) и функциональными показателями физической работоспособности

Показатель	Группа I ($n = 25$)	Группа II ($n = 112$)
	энерготраты за тест, ккал	
МПК, л/мин	$p = 0.000$; $R_s = 0.9$	$p = 0.000$; $R_s = 0.8$
МПК/кг, мл/мин/кг	$p = 0.002$; $R_s = 0.6$	$p = 0.000$; $R_s = 0.6$
ПК ПАНО, л	$p = 0.000$; $R_s = 0.9$	$p = 0.000$; $R_s = 0.4$
Ватт-Пульс ПАНО, Вт	$p = 0.004$; $R_s = 0.5$	$p = 0.000$; $R_s = 0.5$
RWC 170, Вт	$p = 0.005$; $R_s = 0.5$	$p = 0.000$; $R_s = 0.7$

Примечание: МПК – максимальное потребление кислорода; ПК ПАНО – потребление кислорода на пороге анаэробного обмена. Группа I – спортсмены, которые завершили тест до ПАНО, группа II – спортсмены, которые выполнили тест “до отказа”, перешли ПАНО.

Для определения взаимосвязи между показателями ФР и ЭТ за велоэргометрическое тестирование до ПАНО был проведен корреляционный анализ (табл. 4), который показал значимые связи между ЭТ за тест и МПК, ПК ПАНО, Ватт-Пульс ПАНО и RWC 170 у обеих групп обследуемых.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данной статье мы анализировали ЭТП и ЭТ во время субмаксимальной физической нагрузки у высококвалифицированных лыжников-гонщиков.

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 (рис. 2). Сниженный ДК в I группе свидетельствует о том, что большая часть энергии в покое вырабатывается за счет окисления жиров [17], активное использование которых с целью энергообеспечения организма позволяет “экономить” лимитированный гликоген [17, 18], вероятно, да-

же в состоянии покоя. Показано, что среднее значение ДК в состоянии покоя, равное 0.82, отражает тот факт, что организм получает более половины энергии при окислении жирных кислот (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 одна часть потока ЖК окисляется для получения энергии, а оставшаяся – повторно этерифицируется в триглицериды в печени [19]. 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 приближалось 1 : 1. Ранее нами было показано, что выносливые лыжники-гонщики имеют примерно равный процентный вклад Угл и жиров в ЭТП [20]. Учитывая вышеизложенное, соотношение этих макронутриентов примерно равное 1 : 1 в структуре ЭТП может стать маркером высокой ФР спортсменов, однако для этого необходимо проведение дальнейших исследований.

Окисление энергетических субстратов и соответственно вариabельность ЭТП напрямую взаи-

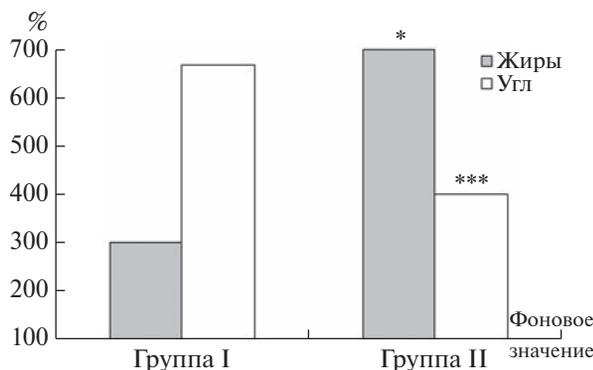


Рис. 3. Процент изменения вклада жиров и углеводов в энерготраты после выполнения нагрузки относительно состояния покоя в двух исследованных группах.

Угл — углеводы; установлены статистически значимые отличия между группами: * — $p < 0.05$, *** — $p < 0.00$. Группа I — спортсмены, которые завершили тест до порога анаэробного обмена (ПАНО), группа II — спортсмены, которые выполнили тест “до отказа”, перешли ПАНО.

мосвязаны с потреблением кислорода (ПК), что подтверждают обнаруженные нами корреляционные связи (табл. 2). Однако, в I группе $VO_{2фон}$ отрицательно коррелирует с $CO_{Угл}$, 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 ФН увеличение интенсивности работы приводит к росту ПК, и как следствие к повышенному запросу энергии в виде аденозинтрифосфорной кислоты (АТФ), которая может поставляться через аэробный и анаэробный метаболические пути, выбор которого напрямую зависит от степени тренированности организма, интенсивности и длительности ФН [19]. 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 [9]. Поэтому для нагрузок субмаксимальной мощности утомление, прежде всего, связано с кислородно-транспортной системой из-за недостаточного снабжения мышц кислородом [9].

При субмаксимальной ФН (до ПАНО) по сравнению с фоновыми показателями макронутриентов (рис. 3) 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 при аэробных на-

грузках одним из главных механизмов утомления является расходование мышечного гликогена, лимитирующего работоспособность. Напротив, в II группе в энергообеспечение субмаксимальной ФН до ПАНО включаются жиры, доля которых увеличивается в 7 раз относительно фоновых значений, что позволяет отодвигать момент истощения лимитированного гликогена, и как следствие, повышать продолжительность выполнения ФН [19]. Следует отметить важный факт (табл. 1), что у спортсменов II группы значимо меньший процент жира в составе тела по сравнению с группой I (соответственно, 12 и 10%), хотя оба показателя находятся в пределах нормативных значений, соответствующих лыжным гонкам. Можно предположить, что значительное увеличение вклада жиров в ЭТ субмаксимальной ФН до ПАНО у спортсменов II группы обусловлено более высокой скоростью их утилизации, что отражено ранее в работе [10]. 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 [15].

Показано, что у элитных спортсменов, тренирующихся на выносливость, хорошо выражен мышечный митохондриальный ретикулум, что обуславливает метаболическую гибкость организма — способность переключаться между окислением липидов и Угл (рис. 3) в зависимости от потребности в энергии и доступности субстрата при ФН [21, 22]. 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 мышечный гликоген и тем самым отодвигать момент его истощения, а, следовательно, повышать продолжительность выполнения нагрузки и развивать выносливость [23, 24].

Установлено, что в большей степени жиры окисляются при ФН низкой и умеренной интенсивности, а Угл окисляются в основном при высокой, однако вклад окисления жиров в общий расход энергии во время ФН при МПК выше 85% обычно игнорируется [10, 25]. Измерение концентрации лактата в крови и $CO_{Ж, max}$ являются косвенными методами оценки метаболической гибкости, работы митохондрий и окислительной способности организма во время ФН [26]. Показано, что лактат может выступать в качестве энергетического субстрата для миокарда во время ФН

[27], при этом доминирующим энергетическим субстратом мышц у высококвалифицированных спортсменов являются жиры, по сравнению с малотренированными людьми, у которых преобладает Угл-зависимое энергообеспечение [26].

Показатели физической и аэробной работоспособности коррелируют с ЭТ за тест (табл. 3). Уже установлено, что МПК является одним из предикторов работоспособности у тренирующихся на выносливость спортсменов [9, 28]. Наши результаты показали, что абсолютные значения МПК между группами не отличались, однако ПК ПАНО было значительно выше в I группе. Можно полагать, что достоверно сниженное ПК ПАНО на 20% относительно МПК в II группе может свидетельствовать об экономизации функциональных резервов и возможности организма выполнять ФН в течение длительного времени, в том числе и в анаэробном режиме. Выявленные взаимосвязи между ЭТ и основными показателями физической и аэробной работоспособности могут быть активно использованы в оценке функционального состояния и результативности высококвалифицированных спортсменов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Соотношение жиров и Угл, приближающееся к 1 : 1 в структуре ЭТП, у спортсменов, тренирующихся на выносливость и способных выполнять максимальную ФН, может стать перспективным маркером высокой ФР спортсменов при прогнозировании результативности. Сниженное значение ПК ПАНО более чем на 20% относительно МПК может свидетельствовать об экономизации функциональных резервов и возможности организма выполнять ФН в течение длительного времени, в том числе и в анаэробном режиме. У спортсменов, выполнивших тестирование “до отказа”, в структуре ЭТ при ФН субмаксимальной мощности происходит экономизация углеводов на фоне активного использования жиров. Именно поэтому сочетанную оценку ЭТ с учетом вклада энергетических субстратов, показателей физической и аэробной работоспособности следует активно вовлекать в изучение ФР высококвалифицированных спортсменов.

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены локальным этическим комитетом Института физиологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН от 28.12.2022 г. (Сыктывкар).

Информированное согласие. Каждый участник исследования представил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных

рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

Финансирование работы. Работа выполнена за счет средств субсидии на выполнение Государственного задания № ГР1021051201877-3-3.1.8 (2022–2026).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Вклад авторов в публикацию. Е.А. Бушманова – существенный вклад в концепцию работы, сбор, обработка и анализ данных, написание текста рукописи. А.Ю. Людина – разработка и координация исследования, критический пересмотр текста рукописи, утверждение окончательного варианта статьи для публикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Levine J.A.* Measurement of energy expenditure // *Public Health Nutr.* 2005. V. 8. № 7A. P. 1123.
2. *Westerterp K.R.* Physical activity and physical activity induced energy expenditure in humans: measurement, determinants, and effects // *Front. Physiol.* 2013. V. 4. P. 90.
3. *Redondo R.B.* Resting energy expenditure; assessment methods and applications // *Nutr. Hosp.* 2015. V. 31. Supl. 3. P. 245.
4. *MacLean P.S., Bergouignan A., Cornier M.-A., Jackman M.R.* Biology's response to dieting: the impetus for weight regain // *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* 2011. V. 301. № 3. P. R581.
5. *Esteves de Oliveira F.C., de Mello Cruz A.C., Gonçalves O.C. et al.* Gasto energético de adultos brasileiros saudáveis: uma comparação de métodos // *Nutr. Hosp.* 2008. V. 23. № 6. P. 554.
6. *MacKenzie-Shalders K., Kelly J.T., Daniel S. et al.* The effect of exercise interventions on resting metabolic rate: A systematic review and meta-analysis // *J. Sports Sci.* 2020. V. 38. № 14. P. 1635.
7. *Jagim A.R., Camic C.L., Kisiolek J. et al.* Accuracy of Resting Metabolic Rate Prediction Equations in Athletes // *J. Strength Cond. Res.* 2018. V. 32. № 7. P. 1875.
8. *Purcell S.A., Johnson-Stoklossa C., Braga Tibaes J.R. et al.* Accuracy and reliability of a portable indirect calorimeter compared to whole-body indirect calorimetry for measuring resting energy expenditure // *Clin. Nutr. ESPEN.* 2020. V. 39. P. 67.
9. *Rømer T., Thunestvedt Hansen M., Frandsen J. et al.* The relationship between peak fat oxidation and prolonged double-pole endurance exercise performance // *Scand. J. Med. Sci. Sports.* 2020. V. 30. № 11. P. 2044.
10. *Lyudinina A.Y., Bushmanova E.A., Varlamova N.G., Bojko E.R.* Dietary and plasma blood α -linolenic acid as modulators of fat oxidation and predictors of aerobic performance // *J. Int. Soc. Sports Nutr.* 2020. V. 17. № 1. P. 57.

11. *Marra M., Di Vincenzo O., Cioffi I. et al.* Resting energy expenditure in elite athletes: development of new predictive equations based on anthropometric variables and bioelectrical impedance analysis derived phase angle // *J. Int. Soc. Sports Nutr.* 2021. V. 18. № 1. P. 68.
12. *Watson A.D., Zabriskie H.A., Witherbee K.E. et al.* Determining a resting metabolic rate prediction equation for collegiate female athletes // *J. Strength Cond. Res.* 2019. V. 33. № 9. P. 2426.
13. *Матвеев Л.П.* Проблема периодизации спортивной тренировки / Гос. центр. ордена Ленина ин-т физ. культуры. Кафедра теории и методики физ. воспитания. 2-е изд. М.: Физкультура и спорт, 1965. 244 с.
14. *Бушманова Е.А., Логинова Т.П., Людинина А.Ю.* Пищевой термогенез низкокалорийной углеводной нагрузки минимально влияет на энергозатраты покая // *Журн. мед.-биол. исследований.* 2023. Т. 11. № 2. С. 153.
Bushmanova E.A., Lodinova T.P., Lyudinina A.Yu. The thermic effect of carbohydrate minimally influence on rest energy expenditure // *J. Med. Biol. Res.* 2023. V. 11. № 2. P. 153.
15. Физиолого-биохимические механизмы обеспечения спортивной деятельности зимних циклических видов спорта / Отв. ред. Бойко Е.П. Сыктывкар: ООО “Коми республиканская типография”, 2019. 256 с.
16. *McGilvery R., Goldstein G.* Biochemistry. A functional approach. Saunders: Philadelphia, PA, 1983. 976 p.
17. *Burke L.M., Hawley J.A.* Effects of short-term fat adaptation on metabolism and performance of prolonged exercise // *Med. Sci. Sports Exerc.* 2002. V. 34. № 9. P. 1492.
18. *Maunder E., Plews D.J., Kilding A.E.* Contextualising Maximal Fat Oxidation During Exercise: Determinants and Normative Values // *Front. Physiol.* 2018. V. 9. P. 599.
19. *Melzer K.* Carbohydrate and fat utilization during rest and physical activity // *E. Spen. Eur. E. J. Clin. Nutr. Metab.* 2011. V. 6. P. e45.
20. *Людинина А.Ю., Бушманова Е.А., Есеева Т.В., Бойко Е.П.* Соответствие энергопотребления энерготратам у лыжников-гонщиков в общеподготовительный период // *Вопросы питания.* 2022. Т. 91. № 1. С. 109.
Lyudinina A.Yu., Bushmanova E.A., Eseva T.V., Boyko E.R. [Accordance of energy intake to energy expenditure in skiers across the preparation phase] // *Vopr. Pitan. [Problems of Nutrition].* 2022. V. 91. № 1. P. 109.
21. *Glancy B., Hartnell L.M., Malide D. et al.* Mitochondrial reticulum for cellular energy distribution in muscle // *Nature.* 2015. V. 523. № 7562. P. 617.
22. *Jacobs R.A., Lundby C.* Mitochondria express enhanced quality as well as quantity in association with aerobic fitness across recreationally active individuals up to elite athletes // *J. Appl. Physiol.* 2013. V. 114. № 3. P. 344.
23. *Da Boit M., Hunter A.M., Gray S.R.* Fit with good fat? The role of n-3 polyunsaturated fatty acids on exercise performance // *Metabolism.* 2016. V. 66. P. 214.
24. *Andersson Hall U., Edin F., Pedersen A., Madsen K.* Whole-body fat oxidation increases more by prior exercise than overnight fasting in elite endurance athletes // *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* 2016. V. 41. № 4. P. 430.
25. *Achten J., Jeukendrup A.E.* Maximal fat oxidation during exercise in trained men // *Int. J. Sports Med.* 2003. V. 24. № 8. P. 603.
26. *San-Millán I., Brooks G.A.* 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 // *Sports Med.* 2018. V. 48. № 2. P. 467.
27. *Dong S., Qian L., Cheng Z. et al.* Lactate and Myocardiac Energy Metabolism // *Front. Physiol.* 2021. V. 12. P. 715081.
28. *Варламова Н.Г., Логинова Т.П., Гарнов И.О. и др.* Частота сердечных сокращений, потребление кислорода и артериальное давление у лыжников разной квалификации в тесте “до отказа” // *Человек. Спорт. Медицина.* 2021. Т. 21. № 1. С. 53.
Varlamova N.G., Loginova T.P., Garnov I.O. et al. Heart rate, oxygen consumption and arterial pressure in skiers of different skill levels in the test to exhaustion // *Human. Sport. Medicine.* 2021. V. 21. № 1. P. 53.

Rest Energy Expenditure and Energy Expenditure During Submaximal Exercise: New Approach to Assessment of Performance in Skiers

E. A. Bushmanova^{a,*}, A. Yu. Lyudinina^{a,**}

^a*Department of Ecological and Medical Physiology, Institute of Physiology, Ural Branch, RAS, Syktyvkar, Russia*

^{*}*E-mail: katerinabushmanova@mail.ru*

^{**}*E-mail: salu_06@inbox.ru*

The aim of the present study was to analyse rest energy expenditure (REE) and energy expenditure (EE) during submaximal exercise according to performance of athletes. A retrospective analysis of data from 2014 to 2020 among cross-country skiers in the preparatory phase was performed. Depending on the potential performance athletes (n = 136) were divided into two groups: I – test completed to the anaerobic threshold (AnT), II – test completed until exhaustion. The present study included the data only before AnT for a correct comparison of the results. REE was 2058.5 ± 220.5 kcal/day in I group and 2023.1 ± 216.4 kcal/day in II group (p = 0.481). In REE structure, the contribution of fats and carbohydrates (CHOs) was 69 and 31% in I group, 48 (p = 0.021) and 52% (p < 0.000) in II group. Correlations between VO_{2rest} and REE, as well as the

rate of fats and CHOs oxidation at rest were revealed. In I and II groups the VO_{2AnT} ($p < 0.000$) and relative values of VO_{2max} ($p < 0.05$) were significantly different. EE before AnT was 135.9 ± 31.2 and 134.0 ± 23.4 kcal ($p = 0.399$) for I and II groups. The present study showed that the balance 1 : 1 of fats and CHOs in the REE structure is a more informative performance marker than quantitative assessment of EE. VO_{2AnT} reduced by 20% relative to VO_{2max} may indicate the functional economization and the body's ability to perform exercise during long time, including in the anaerobic exercise. Endurance athletes demonstrated economy of CHOs against actively using of fats during submaximal exercise. Complex estimated of performance indicators and EE (including contribution fats and CHOs) should be taken into account when studying the performance of athletes.

Keywords: rest energy expenditure, energy expenditure physical activity, submaximal exercise, performance, fats and carbohydrates, endurance athletes, skiers.