

УДК 577.121+796.92

СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ БАЛАНСЕ И ДОСТУПНОСТИ ЭНЕРГИИ В СПОРТЕ

© 2024 г. Е. А. Бушманова*, А. Ю. Людинина**

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

*E-mail: katerinabushmanova@mail.ru

**E-mail: salu_06@inbox.ru

Поступила в редакцию 06.03.2024 г.

После доработки 28.08.2024 г.

Принята к публикации 28.08.2024 г.

Дисбаланс между энергопотреблением и суточным расходом энергии является причиной отрицательного энергетического баланса, а в сочетании с длительными интенсивными физическими нагрузками может привести к развитию низкой доступности энергии (НДЭ). Понятие НДЭ ассоциируется с целым рядом эндокринных, сердечно-сосудистых, воспалительных, желудочно-кишечных и психических изменений, которые были объединены под термином “относительный дефицит энергии в спорте” (*Relative Energy Deficiency in Sport, RED-S*). Проведенный анализ мировой литературы показал высокую распространенность НДЭ и *RED-S* на фоне недостаточной осведомленности тренеров и спортсменов о дефиците энергии и его негативных последствиях для здоровья, что актуализирует значимость данной проблемы. Именно поэтому вопросы ранней диагностики, адекватного лечения и профилактики *RED-S* с учетом специфики вида спорта, пола и возраста имеют большое практическое значение.

Ключевые слова: энергетический баланс, доступность энергии, относительный дефицит энергии в спорте, рациональное питание, спортсмены.

DOI: 10.31857/S0131164624060101 **EDN:** AFHEWH

Нагрузки в современном спорте, выполняемые на пределе физиологических возможностей, в сочетании с нервно-психическим напряжением приводят к возникновению биохимических и функциональных сдвигов, влияющих на физическую работоспособность. В связи с этим результативное выступление спортсменов требует не только правильного построения тренировочного процесса, но и постоянного проведения медико-биологической диагностики функционального состояния с целью раннего предупреждения негативных последствий относительного дефицита энергии для здоровья.

Дисбаланс между энергопотреблением (ЭП) и суточным расходом энергии является причиной отрицательного энергетического баланса (ЭБ), а в сочетании с длительными интенсивными физическими нагрузками (ФН) может привести к развитию низкой доступности энергии (НДЭ). Понятие НДЭ ассоциируется с целым рядом эндокринных, сердечно-сосудистых, воспалительных, желудочно-кишечных и психических изменений, которые были объединены под термином “относительный дефицит энергии в спорте” (*Relative Energy Deficiency in Sport, RED-S*) [1]. На фоне НДЭ происходит

развитие *RED-S*, связанного в первую очередь с диетическими ограничениями, обусловленными требованиями тренерского состава или собственными представлениями спортсмена о позитивном влиянии снижении массы тела (МТ) на физическую работоспособность. Несмотря на разработанные международные рекомендации по питанию [2, 3], большинство спортсменов по-прежнему испытывают энергодефицит в разные периоды годового цикла.

Исследования НДЭ и *RED-S* были сосредоточены в основном на женщинах, однако спортсмены-мужчины также могут быть подвержены воздействию НДЭ [4]. Для них прослеживаются последствия, аналогичные триаде спортсменок, такие как нарушение пищевого поведения, снижение концентрации половых гормонов и низкая минеральная плотность костной ткани [5]. При этом, независимо от пола, риски НДЭ и *RED-S* наиболее высоки для тех спортсменов, которые участвуют в соревнованиях на выносливость, и в тех видах спорта, где важен оптимальный компонентный состав тела [6, 7].

Поверхностное представление спортсменов и тренеров о понятии *RED-S* и потенциальных негативных последствиях отрицательного ЭБ и НДЭ для здоровья и физической работоспособности [8] актуализирует важность изучения энергодефицита в спорте. В настоящем обзоре обобщена научная литература, в которой описаны современные концепции ЭБ, НДЭ и *RED-S* у спортсменов.

Энергетический баланс в годичном цикле спортсменов циклических видов спорта, в том числе лыжников-гонщиков

Суточный расход энергии нетренированного человека включает в себя энерготраты покоя (ЭТП), пищевой термогенез, энерготраты при ФН и без ФН [9, 10]. У спортсменов процентное соотношение компонентов суточных энерготрат меняется в силу специфики спортивной деятельности и проявляется в снижении ЭТП до 50% [11, 12], в основном за счет увеличения энерготрат при ФН, которые могут варьироваться в пределах 25–75% [13] в зависимости от этапа годичного цикла [14, 15]. О необходимости учета расхода энергии для построения эффективного тренировочного процесса и взаимосвязи компонентов суточных энерготрат с особенностями питания, интенсивностью и длительностью ФН спортсменов можно ознакомиться в обзоре [16].

С целью обеспечения высокой физической работоспособности и результативности на разных этапах годичного цикла в спорте высших достижений перед каждым спортсменом, тренирующим выносливость, стоит задача согласовать суточные энерготраты и ЭП для достижения устойчивого ЭБ: ЭБ = ЭП (ккал/сут) – суточные энерготраты (ккал/сут) [17, 18].

Как показывает ряд работ, у большинства спортсменов циклических видов спорта выявлен отрицательный ЭБ (табл. 1) как на этапе подготовки [19–27], так и на этапе соревнований [22, 26, 28–34]. 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 [25], в соревновательный – у спортсменов, занимающихся плаванием [35].

Наиболее очевидным объяснением отрицательного ЭБ среди спортсменов на протяжении всего годичного цикла является классический вопрос о недооценке количества потребляемой энергии. Среди спортсменов непреднамеренное занижение показателей при самостоятельной оценке ЭП может составлять 10–45% суточных энерготрат [36].

Также причины сниженных показателей ЭП могут заключаться в том, что в подготовительный период спортсмены часто целенаправленно уменьшают общее потребление калорий для снижения МТ на фоне большого объема тренировочной нагрузки [14]. Другим объяснением отрицательного ЭБ может служить неточность методов, используемых для оценки ЭП и суточных энерготрат среди спортсменов. В соревновательный период выявление энергодефицита можно объяснить тем, что суточные энерготраты изучаются в дни реальных соревнований, где интенсивность ФН максимальна, а не во время обычных тренировочных дней соревновательного периода, что, вероятно, указывает на переоценку значений суточных энерготрат [14].

Во время подготовительного периода краткосрочный отрицательный ЭБ, ведущий к увеличению использования запасов энергии, по мнению тренеров и спортсменов, допустим для достижения пика формы, но во время соревновательного периода ЭБ необходимо поддерживать на должном уровне [37].

Интерпретация регуляции ЭБ и связанных с ним метаболических изменений в ответ на ФН важна для коррекции тренировочного и восстановительных процессов [9]. Значение МТ остается стабильным при устойчивом ЭБ, однако даже кратковременный дисбаланс энергии в организме может сопровождаться динамическими компенсаторными реакциями, изменяющими МТ [38], причем увеличение/уменьшение МТ приходится на 60–80% изменений жировой массы тела (ЖМТ) [39]. При этом с увеличением уровня физической активности, в частности у высококвалифицированных спортсменов, вариативность МТ незначительна при нарушении ЭБ [40]. Тем не менее длительный отрицательный ЭБ во время тренировочного периода часто приводит к ряду физических (потеря безжировой массы тела (БМТ), снижение качества сна, гормональные изменения, тахикардия в состоянии покоя) и психологических (апатия к тренировкам, повышенный стресс) последствий [41, 42], а любое дальнейшее увеличение тренировочной нагрузки может привести к развитию перетренированности и повышенной заболеваемости [42]. Поэтому для поддержания устойчивого ЭБ каждому спортсмену необходимо следовать рекомендациям по питанию [2, 3] в соответствии с требованиями, предъявляемыми к различным этапам годичного цикла [43].

В ответ на длительный отрицательный ЭБ (обычно вызванный в спорте снижением энергетической ценности рационов и/или увеличением ФН) развивается адаптивный термогенез (АТ) – снижение энерготрат, выражающееся в изменении МТ и компонентного состава тела [44, 45]. В литературе до сих пор отсутствует единое четкое

Таблица 1. Энергетический баланс среди спортсменов циклических видов спорта в подготовительный и соревновательный периоды тренировочного макроцикла

Период	n	Энерготраты		ЭП, ккал/сут	Вид спорта (пол)	Источник
		Покой, ккал/сут	Суточные, ккал			
П	9	1327 ± 83	3913 ± 556	2459 ± 304	Бег (Ж)	[19]
П	6	1581 ± 63	4514 ± 739	3784 ± 91	Бег (М)	[20]
П	9	1571 ± 35		2321 ± 111	Бег (Ж)	[21]
П	11		2159 ± 284	1816 ± 549	Бег (Ж)	[22]
П	9		2520 ± 304	2015 ± 542	Плавание (Ж)	[22]
П	7	1389 ± 34	3957 ± 1219	2214 ± 313	Гребля (Ж)	[23]
П	9	1531 ± 53	3492 ± 249	3165 ± 318	Бег (М)	[24]
П	4		7213 ± 1003	7213 ± 1099	Лыжные гонки (М)	[25]
П	4		4371 ± 525	4347 ± 454	Лыжные гонки (Ж)	[25]
П	23		3095 ± 582	2255 ± 790	Лыжные гонки (М)	[26]
П	10		2580 ± 307	1988 ± 319	Лыжные гонки (Ж)	[26]
П	7	1958 ± 382	4060 ± 955	3869 ± 382	Лыжные гонки (М)	[27]
С	11		2188 ± 239	1679 ± 546	Бег (Ж)	[22]
С	19		13853 ± 2388	5493 ± 2866	Бег, марафон (М)	[28]
С	6		10748 ± 1910	3105 ± 1194	Бег, марафон (Ж)	[28]
С	8		10246 ± 1624	5446 ± 2126	Веломарафон (М)	[29]
С	42	1652 ± 248	4602 ± 538	2648 ± 837	Велогонки (М)	[30]
С	8	2259 ± 189	3981 ± 244	3552 ± 724	Велогонки (Ж)	[31]
С	4		6420 ± 470	4918 ± 810	Велогонки (М)	[32]
С	15	1800 ± 87	3065 ± 290	2275 ± 665	Плавание (Ж)	[33]
С	5	1840 ± 130	5593 ± 495	3136 ± 227	Плавание (Ж)	[34]
С	53		3556 ± 1025	3895 ± 621	Плавание (М, Ж)	[35]
С	9		2550 ± 210	1890 ± 709	Плавание (Ж)	[22]
С	23		2911 ± 508	2125 ± 639	Лыжные гонки (М)	[26]
С	10		2466 ± 327	2011 ± 330	Лыжные гонки (Ж)	[26]

Примечание: данные представлены в виде $M \pm SD$; ЭП – энергопотреблением; П – подготовительный; С – соревновательный; М – мужской; Ж – женский.

определение и методология оценки АТ [45]. Предполагаемые факторы, способствующие развитию АТ, включают изменения в работе симпатической нервной системы (СНС), гормональной регуляции и активности метаболических путей [46, 47]. А в контексте дефицита или избытка ЭП само существование АТ остается спорным [48].

При снижении веса АТ дифференцируют в зависимости от: 1) ЭТП и энерготрат вне ЭТП, 2) фаз снижения МТ, связанных с мобилизацией гликогена, и 3) поддержания сниженной МТ, затрагивающей защитные механизмы организма и риски обратного набора веса [47]. Различают три фазы снижения МТ (рис. 1), ориентированные на две регуляторные системы: изменение метаболизма в ответ на отрицательный ЭБ (фаза I) и поддержание веса после снижения МТ (фаза III). В промежутке (фаза II) изменения энерготрат пропорциональны изменению МТ, а дальнейшего АТ не происходит [44, 46, 47]. В ответ на отрицательный ЭБ снижается поступление диетических (пищевых) источников углерода в митохондрии и, соответственно, потребность в синтезе аденозинтрифосфата дополнительно компенсируется окислением гликогена и триглицеридов. В связи с этим важнейшей характеристикой фазы I является истощение

запасов гликогена, а фазы III – потеря жировых отложений [47].

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 МТ, затем значение ЭТП поддерживается на относительно постоянном уровне вне зависимости от продолжающегося снижения МТ. Напротив, адаптация энерготрат вне покоя прямо пропорциональна потере МТ [44, 47]. В контексте долгосрочного ограничения потребления энергии АТ может привести в целом к снижению ЭТП на 5–10% от первоначальных значений [49], а в ответ на резкую потерю МТ снижение ЭТП может достигать 40–50% [50, 51].

При длительном дефиците калорий развивается фаза II, характеризующаяся потерей ЖМ, активной клеточной массы и мышечной массы, в ответ на продолжающийся отрицательный ЭБ вплоть до точки, где достигается новое устойчивое состояние. Затем поддержание МТ (фаза III) обусловлено степенью снижения ЖМ, низкими уровнем лептина и T₃, а также низкой активностью СНС. Этот эндокринный паттерн несет в себе риск набора излишнего веса вследствие нарушения питания, а

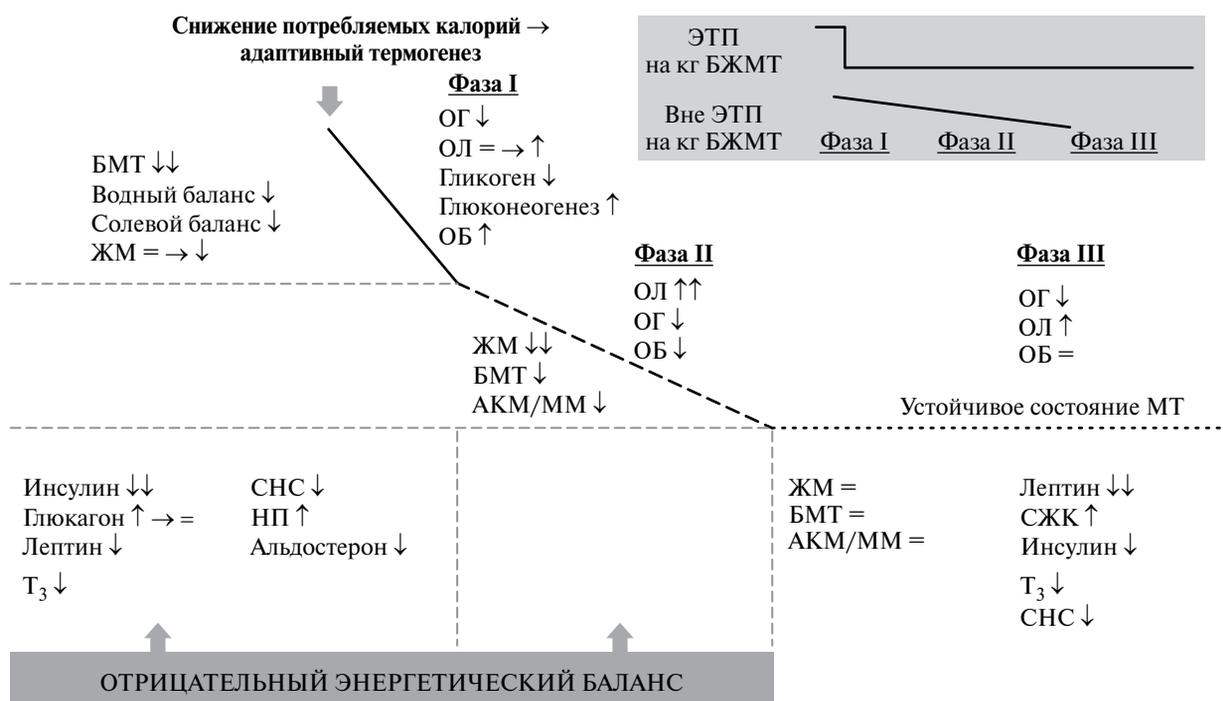


Рис. 1. Метаболическая адаптация при потере массы тела в результате отрицательного энергетического баланса (адаптировано по [47]).

БМТ – безжировая масса тела; ЖМТ – жировая масса тела; 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.

достижение нулевого значения ЭБ не означает, что достигнут здоровый метаболический баланс [52]. 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 [48].

Ограниченные данные [53] свидетельствуют о том, что компонентный состав тела спортсменов может влиять на изменения ЭТП при длительной интенсивной ФН. Считается, что спортсмены могут достичь определенного порога метаболической адаптации в ответ на относительно меньшие вариации МТ [48]. Кроме того, показано, что доступность углеводов (содержание гликогена в печени и мышцах) является ключевым регулирующим фактором ЭБ [54]. Следовательно, если доступность углеводов является регулятором ЭБ, то это может объяснить, почему спортсмены и физически активные люди, для которых характерна высокая чувствительность к инсулину, демонстрируют компенсаторное сокращение ЭП после предыдущего высококалорийного ЭП [55], а также отсутствие дефицита энергии при ФН за счет последующего увеличения ЭП. Однако это, вероятно, происходит на фоне многих других физиологических факторов, также способствующих регулированию ЭБ [9, 56].

Таким образом, поддержание устойчивого уровня ЭБ способствует сохранению стабильной МТ и оптимального компонентного состава тела. Отрицательный ЭБ в подготовительный период годового цикла может быть вызван высокоинтенсивными ФН или несоответствующим ЭП относительно суточных энергозатрат, что распространено 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, учитывая тот факт, что кульминацией хронического отрицательного ЭБ может стать изменение в доступности энергии.

Относительный дефицит энергии в спорте

В последнее время была разработана концепция доступности энергии (ДЭ), которая оказалась более информативна в отношении спортсменов, стремящихся скорректировать МТ и компонентный состав тела на фоне интенсивных ФН [57]. 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 [6, 52].

На сегодняшний день ДЭ определяется по формуле (1) и выражается в ккал·кг⁻¹·БМТ [58]:

$$\text{Доступность энергии} = \frac{\text{ЭП (ккал)} - \text{энергозатраты при ФН (ккал)}}{\text{БМТ (кг)}} \cdot (1)$$

Спортсмены, тренирующие выносливость, стремятся к низкому проценту жировой массы (%ЖМ) в организме и повышенному уровню БМТ [42]. Для достижения желаемого результата многие спортсмены ограничивают калорийность рациона, 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 частых интенсивных ФН и/или при недостаточном длительном ЭП [6, 37, 58, 59].

В последние годы концепция НДЭ расширилась термином *RED-S* [57, 58], под которым понимают синдром, вызывающий гормональный дисбаланс, нарушения реструктуризации костей, иммунной системы, функции желудочно-кишечного тракта и сердечно-сосудистой системы (рис. 2), а также негативно влияющий на самочувствие и физическую работоспособность спортсменов [37, 58, 60]. При этом НДЭ является этиологическим фактором, лежащим в основе *RED-S* [58].

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 [8]. Хотя уже установлено, что к видам спорта с высоким риском развития *RED-S* относятся те, где ключевые параметры успешности напрямую взаимосвязаны с контролем МТ и строго определены стандартами компонентного состава тела, что с высокой долей вероятности обуславливает низкое ЭП и повышенные ФН [17]. 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 [61]. Для женщин было предложено пороговое значение 45 ккал/кг БМТ/день [62], для мужчин два нижних порога — 15 ккал/кг БМТ/день [63] и 30 ккал/кг БМТ/день [64].

В 2014 г. Международный олимпийский комитет разработал инструмент клинической оценки *RED-S* для спортсменов и физически активного населения [1], в котором в зависимости от анамнеза и результатов физиологического обследования спортсмен классифицируется в одну из трех категорий, определяющих участие в спорте: высокий риск (красный свет), умеренный риск (желтый



Рис. 2. Физиологические нарушения при относительном дефиците энергии в спорте. Триада относится к спортсменам женского пола.

свет), низкий риск (зеленый свет). Данный инструмент является предпочтительным, но не золотым стандартом, поскольку симптоматика *RED-S* сложна и включает широкий спектр физиологических (низкий %ЖМ, 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 [1, 59]. 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 [56]. Диагностика *RED-S* включает 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 (рис. 3) 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 [52].

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/день, независимо от того достигается НДЭ за счет дефицита калорий и/или интенсивной ФН [63]. Еще одним гормоном, играющим важную роль в патогенезе развития *RED-S*, является грелин, концентрация которого обратно пропорциональна потере МТ и ДЭ. Вне зависимости от физической активности уровень T_3 последовательно снижается в ответ на НДЭ, что характерно для женщин в долгосрочной перспективе [65], однако краткосрочные и долгосрочные последствия НДЭ в оси гипоталамус-гипофиз-щитовидная железа для мужчин неясны [63, 66].

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 [67]. Аналогичным образом, НДЭ последовательно увеличивает циркулирующий ГР с сопутствующим снижением циркулирующего ИФР-1 [68].

В ответ на НДЭ наблюдается снижение уровня глюкозы в крови, повышение уровня свободных жирных кислот, глицерина и β -гидроксибутирата [59, 62, 63]. В отличие от положительного кардиопротекторного влияния ФН, при развитии

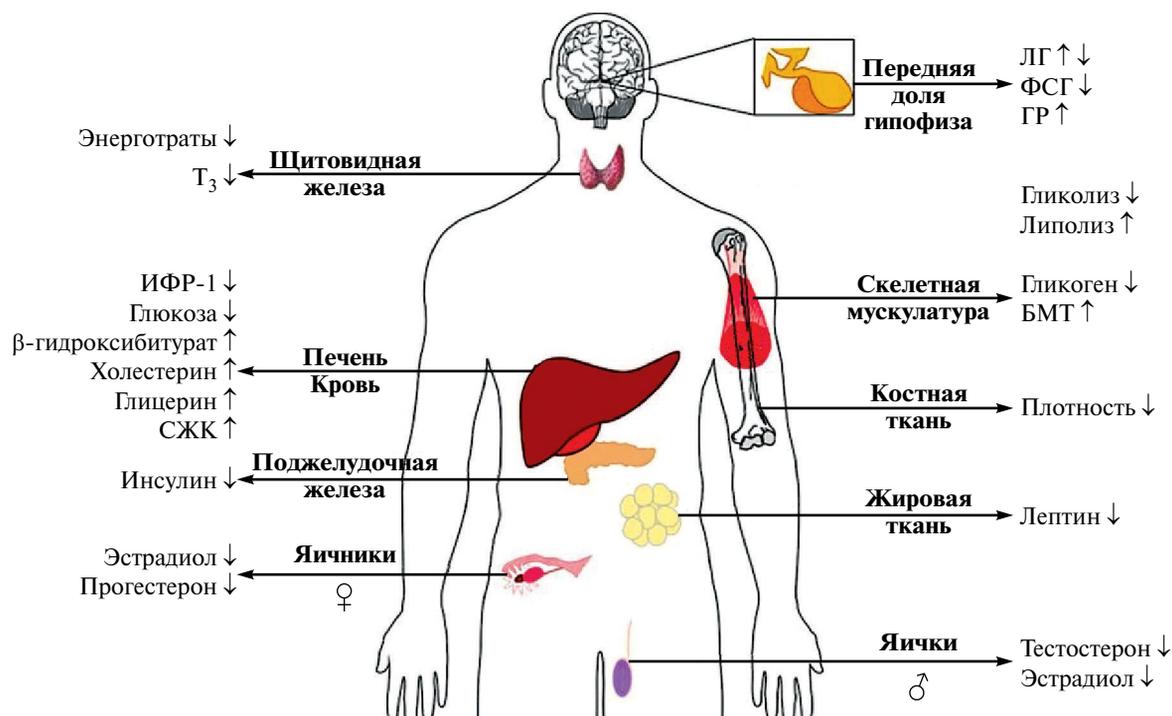


Рис. 3. Обзор отдельных эффектов для организма на фоне низкой доступности энергии.

T₃ – трийодтиронин, ИФР-1 – инсулиноподобный фактор роста, СЖК – свободно-жирные кислоты, ЛГ – лютеинизирующий гормон, ФСГ – фолликулостимулирующий гормон, ГР – гормон роста, БМТ – безжировая масса тела.

состояния НДЭ наблюдается, наоборот, повышение уровня холестерина, что оказывает неблагоприятное воздействие на сердечно-сосудистую систему [7]. Снижение утилизации углеводов 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 [69].

Низкая выработка половых гормонов у спортсменов-женщин ассоциирована с быстрой потерей костной массы, а также вызывает нарушения менструального цикла (сниженный уровень эстрогена) [70], и гипогонадное состояние при ФН (сниженный уровень тестостерона) – у спортсменов-мужчин [71]. При развитии НДЭ происходит повышение 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 энерготрат.

Длительное пребывание в состоянии НДЭ также нарушает мышечную адаптацию, важную как для спортсменов, тренирующих выносливость, так и для занимающихся силовыми видами спорта [37].

В некоторых случаях влияние НДЭ на физическую работоспособность может быть замаскировано эффектом снижения МТ (рис. 4). Потеря МТ может маскировать сниженную физическую работоспособность у спортсменов с НДЭ (рис. 4, А). В этом случае для спортсменов характерна средняя физическая работоспособность, при этом положительный эффект снижения МТ равен отрицательному влиянию НДЭ. Положительный эффект потери МТ, как правило, сопровождается высокой физической работоспособностью и перевешивает негативное влияние НДЭ (рис. 4, Б). Тогда для спортсменов характерна высокая физическая работоспособность, но реализовать в полной мере свой потенциал они не могут из-за НДЭ. Когда негативное влияние НДЭ перевешивает положительный эффект снижения МТ, наблюдается снижение физической работоспособности и развивается повышенная утомляемость, связанная с НДЭ (рис. 4, В).

Оценка ДЭ является трудоемкой задачей, поскольку нет эталонных методов для определения ЭП, энерготрат при ФН и БМТ [6]. 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 [59].

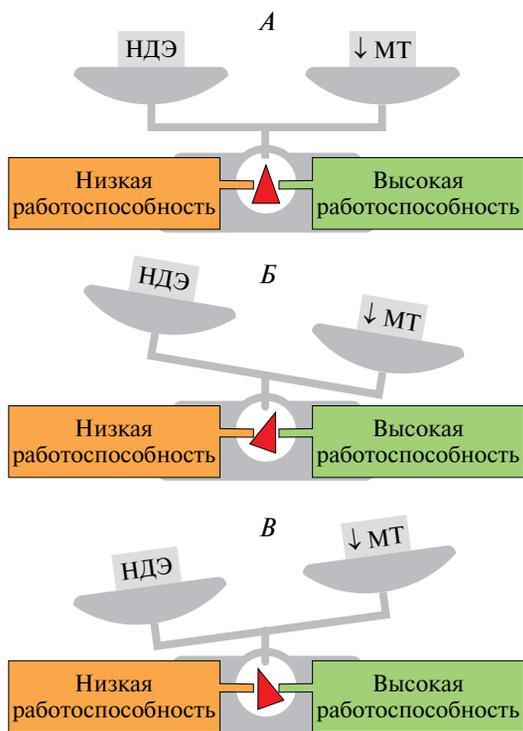


Рис. 4. Взаимосвязь между массой тела спортсмена, низкой доступностью энергии и физической работоспособностью.

Установлено, что у спортсменов с НДЭ показатель ЭТП снижен относительно БМТ по сравнению с теми, у кого диагностирована оптимальная ДЭ [72]. В связи с этим было высказано предположение,

что отношение измеренных ЭТП (иЭТП) к прогнозируемому (расчетному) ЭТП (рЭТП) является валидным маркером НДЭ [4]. Общепринятое значение этого коэффициента < 0.90 диагностирует НДЭ. Однако показано, что пороговое значение коэффициента для обнаружения НДЭ варьируется в зависимости от выбранного прогнозирующего уравнения ЭТП [73]. Именно поэтому данный метод лучше всего использовать в сочетании с другими инструментами оценки ДЭ и RED-S [72, 74].

Симптоматика RED-S имеет большое сходство с синдромом перетренированности, в основе которого 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 МТ и/или компонентами состава тела, вызванных диетическими ограничениями и/или ФН. Напротив, концепция ДЭ связывает ЭП только с энергозатратами при ФН и, таким образом, относится к количеству энергии, доступной для поддержания других физиологических функций вне ФН (рис. 5).

В связи с этим численное значение ДЭ не зависит от других (динамических) компонентов энергозатрат, а, следовательно, не подвержено влиянию АТ [52]. Важным ограничением концепции ДЭ является то, что она не учитывает энергозатраты без ФН и термогенез, вызванных холодом, который,

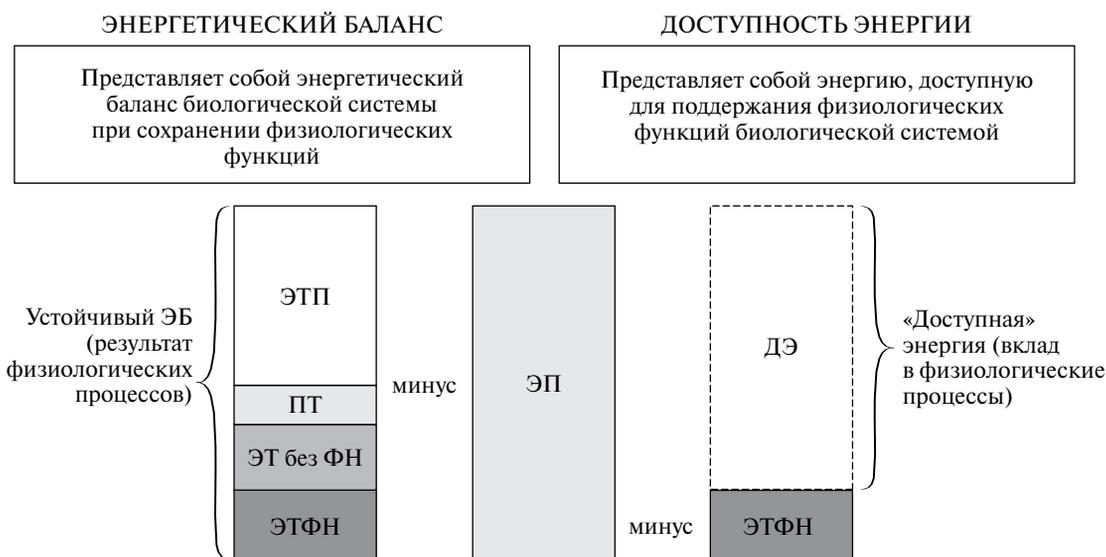


Рис. 5. Различия в концепциях энергетического баланса и доступности энергии. ЭТП – энерготраты покоя; ПТ – пищевой термогенез; ЭТ без ФН – энерготраты без физической нагрузки; ЭТФН – энерготраты при физической нагрузке; ЭП – энергопотребление; ДЭ – доступность энергии; ЭБ – энергетический баланс.

как правило, не берется в расчет в термонеutralных условиях [12]. С физиологической точки зрения нет разницы в энерготратах при ФН и других видах физической активности, определяющихся как любое движение тела, поэтому для установления истинного значения ДЭ необходимо учитывать энерготраты без ФН, что может быть технически сложно осуществимо. Несмотря на то, что вклад энерготрат без ФН в суточный расход энергии ниже у спортсменов в связи с высокими энерготратами при ФН и меньшим количеством времени, доступного для энерготрат без ФН, не следует игнорировать учет энерготрат без ФН при расчете ДЭ [52].

Таким образом, 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 также проведение комплексных обследований для установления краткосрочных и долгосрочных влияний НДЭ и RED-S на организм с целью предотвращения проблем со здоровьем и физической работоспособностью не только среди спортсменов, но и физически активного населения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом ряде спортивных дисциплин энергодефицит может считаться одной из важнейших проблем, оказывающих негативное влияние как на спортивные результаты, так и на функциональное состояние спортсменов. При этом компетентность тренеров, врачей и спортсменов в области синдрома относительного дефицита энергии, потенциальных негативных последствий низкой доступности энергии для здоровья и физической работоспособности чрезвычайно низкая. Несмотря на разницу в концепциях ЭБ и ДЭ, учет этих показателей важен для правильного построения тренировочного процесса и своевременного выявления энергодефицита. Именно поэтому вопросы ранней диагностики, адекватного лечения и профилактики НДЭ и RED-S с учетом специфики вида спорта, возраста и пола имеют большое практическое значение.

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mountjoy M., Sundgot-Borgen J., Burke L.M. et al. The IOC consensus statement: Beyond the female athlete

- triad – Relative energy deficiency in sport (RED-S) // Br. J. Sports Med. 2014. V. 48. № 7. P. 491.
2. Kerksick C.M., Wilborn C.D., Roberts M.D. et al. ISSN exercise & sports nutrition review update: research & recommendations // J. Int. Soc. Sports Nutr. 2018. V. 15. № 1. P. 38.
3. Jagim A.R., Fields J.B., Magee M. et al. The influence of sport nutrition knowledge on body composition and perceptions of dietary requirements in collegiate athletes // Nutrients. 2021. V. 13. № 7. P. 2239.
4. Logue D.M., Madigan S.M., Melin A. et al. Low energy availability in athletes 2020: An updated narrative review of prevalence, risk, within-day energy balance, knowledge and impact on sport performance // Nutrients. 2020. V. 12. № 3. P. 835.
5. De Souza M.J., Koltun K.J., Williams N.I. What is the evidence for a Triad-like syndrome in exercising men? // Curr. Opin. Physiol. 2019. V. 10. P. 27.
6. Burke L.M., Close G.L., Mooses M. et al. Relative energy deficiency in sport in male athletes: A commentary on its presentation among selected groups of male athletes // Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab. 2018. V. 28. № 4. P. 364.
7. Logue D.M., Madigan S.M., Delahunt E. et al. Low energy availability in athletes: A review of prevalence, dietary patterns, physiological health, and sports performance // Sport Med. 2018. V. 48. № 1. P. 73.
8. Brunet P., Ambresin A.E., Gojanovic B. What do you know of RED-S? A field study on adolescent coaches' knowledge // Rev. Med. Suisse. 2019. V. 15. № 657. P. 1334.
9. Gonzalez J.T., Betts J.A., Thompson D. Carbohydrate availability as a regulator of energy balance with exercise // Exerc. Sport Sci. Rev. 2019. V. 47. № 4. P. 215.
10. Taguchi M., Manore M.M. Reexamining the calculations of exercise energy expenditure in the energy availability equation of free-living athletes // Front. Sports Act. Living. 2022. V. 4. P. 885631.
11. Esteves de Oliveira F.C., de Mello Cruz A.C., Gonçalves Oliveira C. et al. Energy expenditure of healthy Brazilian adults: a comparison of methods // Nutr. Hosp. 2008. V. 23. № 6. P. 554.
12. Levine J.A. Measurement of energy expenditure // Public Health Nutr. 2005. V. 8. № 7A. P. 1123.
13. Blasco Redondo R. Resting energy expenditure; assessment methods and applications // Nutr. Hosp. 2015. V. 31. Suppl 3. P. 245.
14. Heydenreich J., Kayser B., Schutz Y., Melzer K. Total energy expenditure, energy intake, and body composition in endurance athletes across the training season: A systematic review // Sports Med. Open. 2017. V. 3. № 1. P. 8.
15. MacKenzie-Shalders K., Kelly J.T., So D. 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.

16. Бушманова Е.А., Людина А.Ю. Современные подходы к оценке энерготрат и энергопотребления у спортсменов // Вопросы питания. 2023. Т. 92. № 5(549). С. 16.
17. Burke L.M., Lundy B., Fahrenholtz I.L., Melin A.K. Pitfalls of conducting and interpreting estimates of energy availability in free-living athletes // Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab. 2018. V. 28. № 4. P. 350.
18. Siedler M.R., De Souza M.J., Albracht-Schulte K. et al. The influence of energy balance and availability on resting metabolic rate: Implications for assessment and future research directions // Sports Med. 2023. V. 53. № 8. P. 1507.
19. Schulz L.O., Alger S., Harper I. et al. Energy expenditure of elite female runners measured by respiratory chamber and doubly labeled water // J. Appl. Physiol. 1992. V. 72. № 1. P. 23.
20. Motonaga K., Yoshida S., Yamagami F. et al. Estimation of total daily energy expenditure and its components by monitoring the heart rate of Japanese endurance athletes // J. Nutr. Sci. Vitaminol (Tokyo). 2006. V. 52. № 5. P. 360.
21. Herring J.L., Mole P.A., Meredith C.N., Stern J.S. Effect of suspending exercise training on resting metabolic rate in women // Med. Sci. Sports Exerc. 1992. V. 24. № 1. P. 59.
22. Hassapidou M.N., Manstrantoni A. Dietary intakes of elite female athletes in Greece // J. Hum. Nutr. Dietetics. 2001. V. 14. № 5. P. 391.
23. Hill R.J., Davies P.S. Energy intake and energy expenditure in elite lightweight female rowers // Med. Sci. Sports Exerc. 2002. V. 34. № 11. P. 1823.
24. Fudge B.W., Westerterp K.R., Kiplamai F.K. et al. Evidence of negative energy balance using doubly labelled water in elite Kenyan endurance runners prior to competition // Br. J. Nutr. 2006. V. 95. № 1. P. 59.
25. Sjodin A.M., Andersson A.B., Hogberg J.M., Westerterp K.R. Energy balance in cross-country skiers: a study using doubly labeled water // Med. Sci. Sports Exerc. 1994. V. 26. № 6. P. 720.
26. Papadopoulou S.K., Gouvianaki A., Grammatikopoulou M.G. et al. Body composition and dietary intake of elite cross-country skiers members of the greek national team // Asian J. Sports Med. 2012. V. 3. № 4. P. 257.
27. Boulay M.R., Serresse O., Almeras N., Tremblay A. Energy expenditure measurement in male cross-country skiers: Comparison of two field methods // Med. Sci. Sports Exerc. 1994. V. 26. № 2. P. 248.
28. Costa R.J., Gill S.K., Hankey J. et al. Perturbed energy balance and hydration status in ultra-endurance runners during a 24 h ultramarathon // Br. J. Nutr. 2014. V. 112. № 3. P. 428.
29. Bescós R., Rodríguez F.A., Iglesias X. et al. Nutritional behavior of cyclists during a 24-hour team relay race: A field study report // J. Int. Soc. Sports Nutr. 2012. V. 9. № 1. P. 3.
30. Armstrong L.E., Casa D.J., Emmanuel H. et al. Nutritional, physiological, and perceptual responses during a summer ultraendurance cycling event // J. Strength Cond. Res. 2012. V. 26. № 2. P. 307.
31. Martin M.K., Martin D.T., Collier G.R., Burke L.M. Voluntary food intake by elite female cyclists during training and racing: influence of daily energy expenditure and body composition // Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab. 2002. V. 12. № 3. P. 249.
32. Hulton A.T., Lahart I., Williams K.L. et al. Energy expenditure in the Race Across America (RAAM) // Int. J. Sports Med. 2010. V. 31. № 7. P. 463.
33. Ousley-Pahnke L., Black D.R., Gretebeck R.J. Dietary intake and energy expenditure of female collegiate swimmers during decreased training prior to competition // J. Am. Diet Assoc. 2001. V. 101. № 3. P. 351.
34. Trappe T.A., Gastaldelli A., Jozsi A.C. et al. Energy expenditure of swimmers during high volume training // Med. Sci. Sports Exerc. 1997. V. 29. № 7. P. 950.
35. Jones P.J., Leitch C.A. Validation of doubly labeled water for measurement of caloric expenditure in collegiate swimmers // J. Appl. Physiol. 1993. V. 74. № 6. P. 2909.
36. Magkos F., Yannakoulia M. Methodology of dietary assessment in athletes: concepts and pitfalls // Curr. Opin. Clin. Nutr. Metab. Care. 2003. V. 6. № 5. P. 539.
37. Wasserfurth P., Palmowski J., Hahn A., Krüger K. Reasons for and consequences of low energy availability in female and male athletes: Social environment, adaptations, and prevention // Sports Med. Open. 2020. V. 6. № 1. P. 44.
38. Hall K.D., Heymsfield S.B., Kemnitz J.W. et al. Energy balance and its components: implications for body weight regulation // Am. J. Clin. Nutr. 2012. V. 95. № 4. P. 989.
39. Hill J.O., Wyatt H.R., Peters J.C. The importance of energy balance // Eur. Endocrinol. 2013. V. 9. № 2. P. 111.
40. Hankinson A.L., Daviglius M.L., Bouchard C. et al. Maintaining a high physical activity level over 20 years and weight gain // JAMA. 2010. V. 304. № 23. P. 2603.
41. Loucks A.B. Energy balance and body composition in sports and exercise // J. Sports Sci. 2004. V. 22. № 1. P. 1.
42. Sundgot-Borgen J., Meyer N.L., Lohman T.G. et al. 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 // Br. J. Sports Med. 2013. V. 47. № 16. P. 1012.

43. *Stellingwerff T., Boit M.K., Res P.T.* Nutritional strategies to optimize training and racing in middle-distance athletes // *J. Sports Sci.* 2007. V. 25. Suppl 1. P. S17.
44. *Soares M.J., Müller M.J.* Resting energy expenditure and body composition: critical aspects for clinical nutrition // *Eur. J. Clin. Nutr.* 2018. V. 72. № 9. P. 1208.
45. *Nunes C.L., Jesus F., Francisco R. et al.* Adaptive thermogenesis after moderate weight loss: Magnitude and methodological issues // *Eur. J. Nutr.* 2021. V. 61. № 3. P. 1405.
46. *Egan A.M., Collins A.L.* Dynamic changes in energy expenditure in response to underfeeding: a review // *Proc. Nutr. Soc.* 2022. V. 81. № 2. P. 199.
47. *Muller M.J., Enderle J., Bosy-Westphal A.* Changes in energy expenditure with weight gain and weight loss in humans // *Curr. Obes. Rep.* 2016. V. 5. № 4. P. 413.
48. *Siedler M.R., De Souza M.J., Albracht-Schulte K. et al.* The influence of energy balance and availability on resting metabolic rate: Implications for assessment and future research directions // *Sports Med.* 2023. V. 53. № 8. P. 1507.
49. *Westerterp K.R.* Metabolic adaptations to over- and underfeeding—still a matter of debate? // *Eur. J. Clin. Nutr.* 2013. V. 67. № 5. P. 443.
50. *Martins C., Roekenes J., Salamati S. et al.* Metabolic adaptation is an illusion, only present when participants are in negative energy balance // *Am. J. Clin. Nutr.* 2020. V. 112. № 5. P. 1212.
51. *Martin A., Fox D., Murphy C.A. et al.* Tissue losses and metabolic adaptations both contribute to the reduction in resting metabolic rate following weight loss // *Int. J. Obes (Lond).* 2022. V. 46. № 6. P. 1168.
52. *Areta J.L., Taylor H.L., Koehler K.* Low energy availability: history, definition and evidence of its endocrine, metabolic and physiological effects in prospective studies in females and males // *Eur. J. Appl. Physiol.* 2021. V. 121. № 1. P. 1.
53. *Woods A.L., Rice A.J., Garvican-Lewis L.A. et al.* The effects of intensified training on resting metabolic rate (RMR), body composition and performance in trained cyclists // *PLoS One.* 2018. V. 13. № 2. P. e0191644.
54. *Edinburgh R.M., Hengist A., Smith H.A. et al.* Skipping breakfast before exercise creates a more negative 24-hour energy balance: A randomized controlled trial in healthy physically active young men // *J. Nutr.* 2019. V. 149. № 8. P. 1326.
55. *Beaulieu K., Hopkins M., Long C. et al.* High habitual physical activity improves acute energy compensation in nonobese adults // *Med. Sci. Sport Exerc.* 2017. V. 49. № 11. P. 2268.
56. *Lodge M.T., Ward-Ritacco C.L., Melanson K.J.* Considerations of Low Carbohydrate Availability (LCA) to Relative Energy Deficiency in Sport (RED-S) in Female Endurance Athletes: A narrative review // *Nutrients.* 2023. V. 15. № 20. P. 4457.
57. *Loucks A.B., Kiens B., Wright H.H.* Energy availability in athletes // *J. Sports Sci.* 2011. V. 29. Suppl 1. P. S7.
58. *Mounjoy M., Sundgot-Borgen J.K., Burke L.M. et al.* IOC consensus statement on relative energy deficiency in sport (RED-S): 2018 update // *Br. J. Sports Med.* 2018. V. 52. № 11. P. 687.
59. *Sim A., Burns S.F.* Review: questionnaires as measures for low energy availability (LEA) and relative energy deficiency in sport (RED-S) in athletes // *J. Eat Disord.* 2021. V. 9. № 1. P. 41.
60. *Desbrow B., Slater G., Cox G.R.* Sports nutrition for the recreational athlete // *Aust. J. Gen Pract.* 2020. V. 49. № 1–2. P. 17.
61. *Jurov I., Keay N., Hadžić V. et al.* Relationship between energy availability, energy conservation and cognitive restraint with performance measures in male endurance athletes // *J. Int. Soc. Sports Nutr.* 2021. V. 18. № 1. P. 24.
62. *Loucks A.B., Thuma J.R.* Luteinizing hormone pulsatility is disrupted at a threshold of energy availability in regularly menstruating women // *J. Clin. Endocrinol. Metab.* 2003. V. 88. № 1. P. 297.
63. *Koehler K., Hoerner N.R., Gibbs J.C. et al.* Low energy availability in exercising men is associated with reduced leptin and insulin but not with changes in other metabolic hormones // *J. Sports Sci.* 2016. V. 34. № 20. P. 1921.
64. *Viner R.T., Harris M., Berning J.R., Meyer N.L.* Energy availability and dietary patterns of adult male and female competitive cyclists with lower than expected bone mineral density // *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 2015. V. 25. № 6. P. 594.
65. *Elliott-Sale K.J., Tenforde A.S., Parziale A.L. et al.* Endocrine effects of relative energy deficiency in sport // *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 2018. V. 28. № 4. P. 335.
66. *Papageorgiou M., Elliott-Sale K.J., Parsons A. et al.* Effects of reduced energy availability on bone metabolism in women and men // *Bone.* 2017. V. 105. P. 191.
67. *Fazeli P.K., Klibanski A.* Determinants of GH resistance in malnutrition // *J. Endocrinol.* 2014. V. 220. № 3. P. R57.
68. *Murphy C., Koehler K.* Caloric restriction induces anabolic resistance to resistance exercise // *Eur. J. Appl. Physiol.* 2020. V. 120. № 5. P. 1155.
69. *Stellingwerff T., Maughan R.J., Burke L.M.* Nutrition for power sports: middledistance running, track cycling, rowing, canoeing/kayaking, and swimming // *J. Sports Sci.* 2011. V. 29. Suppl 1. P. S79.
70. *Nattiv A., Loucks A.B., Manore M.M. et al.* American College of Sports Medicine position stand. The female athlete triad // *Med. Sci. Sports Exerc.* 2007. V. 39. № 10. P. 1867.
71. *Hooper D.R., Tenforde A.S., Hackney A.C.* Treating exercise-associated low testosterone and its related

- symptoms // *Phys. Sportsmed.* 2018. V. 46. № 4. P. 427.
72. *Schofield K.L., Thorpe H., Sims S.T.* Resting metabolic rate prediction equations and the validity to assess energy deficiency in the athlete population // *Exp. Physiol.* 2019. V. 104. № 4. P. 469.
73. *Strock N.-C.A., Koltun K.J., Southmayd E.A. et al.* Indices of resting metabolic rate accurately reflect energy deficiency in exercising women // *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 2020. V. 30. № 1. P. 14.
74. *Sterringer T., Larson-Meyer D.E.* RMR ratio as a surrogate marker for low energy availability // *Curr. Nutr. Rep.* 2022. V. 11. № 2. P. 263.
11. *Esteves de Oliveira F.C., de Mello Cruz A.C., Gonçalves Oliveira C. et al.* Energy expenditure of healthy Brazilian adults: A comparison of methods // *Nutr. Hosp.* 2008. V. 23. № 6. P. 554.
12. *Levine J.A.* Measurement of energy expenditure // *Public Health Nutr.* 2005. V. 8. № 7A. P. 1123.
13. *Blasco Redondo R.* Resting energy expenditure; assessment methods and applications // *Nutr. Hosp.* 2015. V. 31. Suppl 3. P. 245.
14. *Heydenreich J., Kayser B., Schutz Y., Melzer K.* Total energy expenditure, energy intake, and body composition in endurance athletes across the training season: A systematic review // *Sports Med. Open.* 2017. V. 3. № 1. P. 8.
15. *MacKenzie-Shalders K., Kelly J.T., So D. 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.
16. *Bushmanova E.A., Lyudinina A.Yu.* [Contemporary approaches to the assessment of energy intake and energy expenditure in athletes] // *Vopr. Pitan. (Problems of Nutrition)*. 2023. V. 92. № 5(549). P. 16.
17. *Burke L.M., Lundy B., Fahrenholtz I.L., Melin A.K.* Pitfalls of conducting and interpreting estimates of energy availability in free-living athletes // *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 2018. V. 28. № 4. P. 350.
18. *Siedler M.R., De Souza M.J., Albracht-Schulte K. et al.* The influence of energy balance and availability on resting metabolic rate: Implications for assessment and future research directions // *Sports Med.* 2023. V. 53. № 8. P. 1507.
19. *Schulz L.O., Alger S., Harper I. et al.* Energy expenditure of elite female runners measured by respiratory chamber and doubly labeled water // *J. Appl. Physiol.* 1992. V. 72. № 1. P. 23.
20. *Motonaga K., Yoshida S., Yamagami F. et al.* Estimation of total daily energy expenditure and its components by monitoring the heart rate of Japanese endurance athletes // *J. Nutr. Sci. Vitaminol (Tokyo)*. 2006. V. 52. № 5. P. 360.
21. *Herring J.L., Mole P.A., Meredith C.N., Stern J.S.* Effect of suspending exercise training on resting metabolic rate in women // *Med. Sci. Sports Exerc.* 1992. V. 24. № 1. P. 59.
22. *Hassapidou M.N., Manstrantoni A.* Dietary intakes of elite female athletes in Greece // *J. Hum. Nutr. Dietetics.* 2001. V. 14. № 5. P. 391.
23. *Hill R.J., Davies P.S.* Energy intake and energy expenditure in elite lightweight female rowers // *Med. Sci. Sports Exerc.* 2002. V. 34. № 11. P. 1823.
24. *Fudge B.W., Westerterp K.R., Kiplamai F.K. et al.* Evidence of negative energy balance using doubly labelled water in elite Kenyan endurance runners prior to competition // *Br. J. Nutr.* 2006. V. 95. № 1. P. 59.
25. *Sjodin A.M., Andersson A.B., Hogberg J.M., Westerterp K.R.* Energy balance in cross-country skiers: A study

REFERENCES

1. *Mountjoy M., Sundgot-Borgen J., Burke L.M. et al.* The IOC consensus statement: Beyond the female athlete triad – Relative energy deficiency in sport (RED-S) // *Br. J. Sports Med.* 2014. V. 48. № 7. P. 491.
2. *Kerksick C.M., Wilborn C.D., Roberts M.D. et al.* ISSN exercise & sports nutrition review update: research & recommendations // *J. Int. Soc. Sports Nutr.* 2018. V. 15. № 1. P. 38.
3. *Jagim A.R., Fields J.B., Magee M. et al.* The influence of sport nutrition knowledge on body composition and perceptions of dietary requirements in collegiate athletes // *Nutrients.* 2021. V. 13. № 7. P. 2239.
4. *Logue D.M., Madigan S.M., Melin A. et al.* Low energy availability in athletes 2020: An updated narrative review of prevalence, risk, within-day energy balance, knowledge and impact on sport performance // *Nutrients.* 2020. V. 12. № 3. P. 835.
5. *De Souza M.J., Koltun K.J., Williams N.I.* What is the evidence for a Triad-like syndrome in exercising men? // *Curr. Opin. Physiol.* 2019. V. 10. P. 27.
6. *Burke L.M., Close G.L., Mooses M. et al.* Relative energy deficiency in sport in male athletes: A commentary on its presentation among selected groups of male athletes // *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 2018. V. 28. № 4. P. 364.
7. *Logue D.M., Madigan S.M., Delahunt E. et al.* Low energy availability in athletes: A review of prevalence, dietary patterns, physiological health, and sports performance // *Sport Med.* 2018. V. 48. № 1. P. 73.
8. *Brunet P., Ambresin A.E., Gojanovic B.* What do you know of RED-S? A field study on adolescent coaches' knowledge // *Rev. Med. Suisse.* 2019. V. 15. № 657. P. 1334.
9. *Gonzalez J.T., Betts J.A., Thompson D.* Carbohydrate availability as a regulator of energy balance with exercise // *Exerc. Sport Sci. Rev.* 2019. V. 47. № 4. P. 215.
10. *Taguchi M., Manore M.M.* Reexamining the calculations of exercise energy expenditure in the energy availability equation of free-living athletes // *Front. Sports Act. Living.* 2022. V. 4. P. 885631.

- using doubly labeled water // *Med. Sci. Sports Exerc.* 1994. V. 26. № 6. P. 720.
26. *Papadopoulou S.K., Gouvianaki A., Grammatikopoulou M.G. et al.* Body composition and dietary intake of elite cross-country skiers members of the greek national team // *Asian J. Sports Med.* 2012. V. 3. № 4. P. 257.
 27. *Boulay M.R., Serresse O., Almeras N., Tremblay A.* Energy expenditure measurement in male cross-country skiers: comparison of two field methods // *Med. Sci. Sports Exerc.* 1994. V. 26. № 2. P. 248.
 28. *Costa R.J., Gill S.K., Hankey J. et al.* Perturbed energy balance and hydration status in ultra-endurance runners during a 24 h ultramarathon // *Br. J. Nutr.* 2014. V. 112. № 3. P. 428.
 29. *Bescós R., Rodríguez F.A., Iglesias X. et al.* Nutritional behavior of cyclists during a 24-hour team relay race: A field study report // *J. Int. Soc. Sports Nutr.* 2012. V. 9. № 1. P. 3.
 30. *Armstrong L.E., Casa D.J., Emmanuel H. et al.* Nutritional, physiological, and perceptual responses during a summer ultraendurance cycling event // *J. Strength Cond. Res.* 2012. V. 26. № 2. P. 307.
 31. *Martin M.K., Martin D.T., Collier G.R., Burke L.M.* Voluntary food intake by elite female cyclists during training and racing: influence of daily energy expenditure and body composition // *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 2002. V. 12. № 3. P. 249.
 32. *Hulton A.T., Lahart I., Williams K.L. et al.* Energy expenditure in the Race Across America (RAAM) // *Int. J. Sports Med.* 2010. V. 31. № 7. P. 463.
 33. *Ousley-Pahnke L., Black D.R., Gretebeck R.J.* Dietary intake and energy expenditure of female collegiate swimmers during decreased training prior to competition // *J. Am. Diet Assoc.* 2001. V. 101. № 3. P. 351.
 34. *Trappe T.A., Gastaldelli A., Jozsi A.C. et al.* Energy expenditure of swimmers during high volume training // *Med. Sci. Sports Exerc.* 1997. V. 29. № 7. P. 950.
 35. *Jones P.J., Leitch C.A.* Validation of doubly labeled water for measurement of caloric expenditure in collegiate swimmers // *J. Appl. Physiol.* 1993. V. 74. № 6. P. 2909.
 36. *Magkos F., Yannakoulia M.* Methodology of dietary assessment in athletes: Concepts and pitfalls // *Curr. Opin. Clin. Nutr. Metab. Care.* 2003. V. 6. № 5. P. 539.
 37. *Wasserfurth P., Palmowski J., Hahn A., Krüger K.* Reasons for and consequences of low energy availability in female and male athletes: Social environment, adaptations, and prevention // *Sports Med. Open.* 2020. V. 6. № 1. P. 44.
 38. *Hall K.D., Heymsfield S.B., Kemnitz J.W. et al.* Energy balance and its components: implications for body weight regulation // *Am. J. Clin. Nutr.* 2012. V. 95. № 4. P. 989.
 39. *Hill J.O., Wyatt H.R., Peters J.C.* The importance of energy balance // *Eur. Endocrinol.* 2013. V. 9. № 2. P. 111.
 40. *Hankinson A.L., Daviglius M.L., Bouchard C. et al.* Maintaining a high physical activity level over 20 years and weight gain // *JAMA.* 2010. V. 304. № 23. P. 2603.
 41. *Loucks A.B.* Energy balance and body composition in sports and exercise // *J. Sports Sci.* 2004. V. 22. № 1. P. 1.
 42. *Sundgot-Borgen J., Meyer N.L., Lohman T.G. et al.* 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 // *Br. J. Sports Med.* 2013. V. 47. № 16. P. 1012.
 43. *Stellingwerff T., Boit M.K., Res P.T.* Nutritional strategies to optimize training and racing in middle-distance athletes // *J. Sports Sci.* 2007. V. 25. Suppl 1. P. S17.
 44. *Soares M.J., Müller M.J.* Resting energy expenditure and body composition: Critical aspects for clinical nutrition // *Eur. J. Clin. Nutr.* 2018. V. 72. № 9. P. 1208.
 45. *Nunes C.L., Jesus F., Francisco R. et al.* Adaptive thermogenesis after moderate weight loss: Magnitude and methodological issues // *Eur. J. Nutr.* 2021. V. 61. № 3. P. 1405.
 46. *Egan A.M., Collins A.L.* Dynamic changes in energy expenditure in response to underfeeding: A review // *Proc. Nutr. Soc.* 2022. V. 81. № 2. P. 199.
 47. *Muller M.J., Enderle J., Bosy-Westphal A.* Changes in energy expenditure with weight gain and weight loss in humans // *Curr. Obes. Rep.* 2016. V. 5. № 4. P. 413.
 48. *Siedler M.R., De Souza M.J., Albracht-Schulte K. et al.* The influence of energy balance and availability on resting metabolic rate: Implications for assessment and future research directions // *Sports Med.* 2023. V. 53. № 8. P. 1507.
 49. *Westerterp K.R.* Metabolic adaptations to over- and underfeeding— still a matter of debate? // *Eur. J. Clin. Nutr.* 2013. V. 67. № 5. P. 443.
 50. *Martins C., Roekenes J., Salamati S. et al.* Metabolic adaptation is an illusion, only present when participants are in negative energy balance // *Am. J. Clin. Nutr.* 2020. V. 112. № 5. P. 1212.
 51. *Martin A., Fox D., Murphy C.A. et al.* Tissue losses and metabolic adaptations both contribute to the reduction in resting metabolic rate following weight loss // *Int. J. Obes (Lond).* 2022. V. 46. № 6. P. 1168.
 52. *Areta J.L., Taylor H.L., Koehler K.* Low energy availability: history, definition and evidence of its endocrine, metabolic and physiological effects in

- prospective studies in females and males // *Eur. J. Appl Physiol.* 2021. V. 121. № 1. P. 1.
53. Woods A.L., Rice A.J., Garvican-Lewis L.A. et al. The effects of intensified training on resting metabolic rate (RMR), body composition and performance in trained cyclists // *PLoS One.* 2018. V. 13. № 2. P. e0191644.
54. Edinburgh R.M., Hengist A., Smith H.A. et al. Skipping breakfast before exercise creates a more negative 24-hour energy balance: A randomized controlled trial in healthy physically active young men // *J. Nutr.* 2019. V. 149. № 8. P. 1326.
55. Beaulieu K., Hopkins M., Long C. et al. High habitual physical activity improves acute energy compensation in nonobese adults // *Med. Sci. Sport Exerc.* 2017. V. 49. № 11. P. 2268.
56. Lodge M.T., Ward-Ritacco C.L., Melanson K.J. Considerations of Low Carbohydrate Availability (LCA) to Relative Energy Deficiency in Sport (RED-S) in Female Endurance Athletes: A narrative review // *Nutrients.* 2023. V. 15. № 20. P. 4457.
57. Loucks A.B., Kiens B., Wright H.H. Energy availability in athletes // *J. Sports Sci.* 2011. V. 29. Suppl 1. P. S7.
58. Mountjoy M., Sundgot-Borgen J.K., Burke L.M. et al. IOC consensus statement on relative energy deficiency in sport (RED-S): 2018 update // *Br. J. Sports Med.* 2018. V. 52. № 11. P. 687.
59. Sim A., Burns S.F. Review: questionnaires as measures for low energy availability (LEA) and relative energy deficiency in sport (RED-S) in athletes // *J. Eat Disord.* 2021. V. 9. № 1. P. 41.
60. Desbrow B., Slater G., Cox G.R. Sports nutrition for the recreational athlete // *Aust. J. Gen Pract.* 2020. V. 49. № 1–2. P. 17.
61. Jurov I., Keay N., Hadžić V. et al. Relationship between energy availability, energy conservation and cognitive restraint with performance measures in male endurance athletes // *J. Int. Soc. Sports Nutr.* 2021. V. 18. № 1. P. 24.
62. Loucks A.B., Thuma J.R. Luteinizing hormone pulsatility is disrupted at a threshold of energy availability in regularly menstruating women // *J. Clin. Endocrinol. Metab.* 2003. V. 88. № 1. P. 297.
63. Koehler K., Hoerner N.R., Gibbs J.C. et al. Low energy availability in exercising men is associated with reduced leptin and insulin but not with changes in other metabolic hormones // *J. Sports Sci.* 2016. V. 34. № 20. P. 1921.
64. Viner R.T., Harris M., Berning J.R., Meyer N.L. Energy availability and dietary patterns of adult male and female competitive cyclists with lower than expected bone mineral density // *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 2015. V. 25. № 6. P. 594.
65. Elliott-Sale K.J., Tenforde A.S., Parziale A.L. et al. Endocrine effects of relative energy deficiency in sport // *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 2018. V. 28. № 4. P. 335.
66. Papageorgiou M., Elliott-Sale K.J., Parsons A. et al. Effects of reduced energy availability on bone metabolism in women and men // *Bone.* 2017. V. 105. P. 191.
67. Fazeli P.K., Klibanski A. Determinants of GH resistance in malnutrition // *J. Endocrinol.* 2014. V. 220. № 3. P. R57.
68. Murphy C., Koehler K. Caloric restriction induces anabolic resistance to resistance exercise // *Eur. J. Appl. Physiol.* 2020. V. 120. № 5. P. 1155.
69. Stellingwerff T., Maughan R.J., Burke L.M. Nutrition for power sports: middledistance running, track cycling, rowing, canoeing/kayaking, and swimming // *J. Sports Sci.* 2011. V. 29. Suppl 1. P. S79.
70. Nattiv A., Loucks A.B., Manore M.M. et al. American College of Sports Medicine position stand. The female athlete triad // *Med. Sci. Sports Exerc.* 2007. V. 39. № 10. P. 1867.
71. Hooper D.R., Tenforde A.S., Hackney A.C. Treating exercise-associated low testosterone and its related symptoms // *Phys. Sportsmed.* 2018. V. 46. № 4. P. 427.
72. Schofield K.L., Thorpe H., Sims S.T. Resting metabolic rate prediction equations and the validity to assess energy deficiency in the athlete population // *Exp. Physiol.* 2019. V. 104. № 4. P. 469.
73. Strock N.-C.A., Koltun K.J., Southmayd E.A. et al. Indices of resting metabolic rate accurately reflect energy deficiency in exercising women // *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 2020. V. 30. № 1. P. 14.
74. Sterringer T., Larson-Meyer D.E. RMR ratio as a surrogate marker for low energy availability // *Curr. Nutr. Rep.* 2022. V. 11. № 2. P. 263.

The Modern Concepts of Energy Balance and Energy Availability in Sports

E. A. Bushmanova*, A. Yu. Lyudinina**

Department of Ecological and Medical Physiology, Institute of Physiology, Ural Branch, RAS, Komi Republic, Komi Republic, Syktyvkar, Russia

**E-mail: katerinabushmanova@mail.ru*

***E-mail: salu_06@inbox.ru*

The imbalance between energy intake and total energy expenditure is the cause of a negative energy balance, and in combination with prolonged intense exercise, it can lead to the development of low energy availability (LEA). The concept of LEA is associated with a number of endocrine, cardiovascular, inflammatory, gastrointestinal, and mental characteristics, which have been combined under the term Relative Energy Deficiency in Sport (RED-S). The analysis of the world literature has shown a high prevalence of LEA and RED-S against the background of insufficient awareness of coaches and athletes about energy deficiency and its negative health consequences, which actualizes the importance of this problem. That is why the issues of early diagnosis, adequate treatment, and prevention of RED-S, taking into account the specifics of the sport, gender, and age, are of great practical importance.

Keywords: energy balance, energy availability, relative energy deficit in sports, nutrition, athletes.