

## ОСОБЕННОСТИ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ МЫШЕЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В МАРАФОНСКОМ БЕГЕ

Р.И. Кашапов, Р.Р. Кашапов

ФГБОУ ВО «Поволжская государственная академия физической культуры, спорта и туризма», Казань, Россия

Email: kashapov\_ri@rambler.ru

### Аннотация

**Цель исследования:** литературный обзор результатов исследований энергетики мышечной работы бегунов на марафонские дистанции.

**Материалы и методы.** Был произведён анализ литературных источников, входящих в базы цитирования Web of Science, Scopus, РИНЦ, по исследованию особенностей энергообеспечения марафонцев.

**Результаты.** Анализ результатов исследований последних лет по данной проблеме показывает, что марафонский бег стал одним из наиболее популярных во всем мире соревнований среди широких слоев населения. Многие любители-бегуны, профессиональные марафонцы и их тренеры проявляют интерес к изучению обстоятельств, позволяющих успешно преодолевать длинные и марафонские дистанции, среди которых важнейшую роль играет обеспечение энергией главных мышечных групп. Поэтому большое внимание уделяется научным исследованиям особенностей синтеза и расхода энергии организмом бегуна-марафонца во время продолжительной мышечной работы. Особая роль в тренировочной и соревновательной деятельности бегунов отводится большому беговому объёму работы аэробной системы, основными источниками для которой являются вещества преимущественно углеводной и жировой природы. Прагматичный подход к качественному и правильному планированию беговых тренировок определяет рациональное и эффективное потребление источников энергии благодаря оптимальному сочетанию расходов углеводов и жиров во время продолжительного бега. С целью достижения такого эффективного энергетического распределения желательно тренировать способность организма бегуна к более раннему включению механизмов окисления веществ жировой природы для обеспечения работы мышц энергией во время бега.

**Заключение.** Физическую работоспособность для успешного преодоления марафонской дистанции можно повысить за счет активизации аэробных процессов энергетического обеспечения, т.е. за счет «экономии» гликолитического вклада энергопродукции, что достигается тренировочной работой в больших объемах.

**Ключевые слова:** выносливость, марафонский бег, энергетический обмен, аэробная работоспособность, системы энергообеспечения.

### FEATURES OF ENERGY SUPPLY OF MUSCULAR ACTIVITY IN A MARATHON

R.I. Kashapov, R.R. Kashapov

Volga Region State Academy of Physical Culture, Sport and Tourism, Kazan, Russia

### Abstract

**Purpose of research:** a literary review of the findings of research focused on energy of muscular work of marathon runners.

**Materials and methods.** We carried out the analysis of data sources from Web of Science, Scopus, RSCI on investigation of energy supply of marathon runners.

**Results.** Analysis of findings of recent studies on this issue reveals that a marathon has become one of the most popular competitions among the general population around the world. Many amateur and professional marathon runners, and their coaches show their interest in exploring the circumstances that make it possible to successfully overcome long and marathon distances, among which the main role is played by energy supply for the main muscle groups. Therefore, much attention is paid to scientific studies of the characteristics of energy synthesis and input of a marathon runner during continuous muscular work. A special role in training and competitive activities of runners is assigned to the large functioning volume of the aerobic system, the main sources for which are substances of predominantly carbohydrate and fat origin. A pragmatic approach to the quality and proper planning of running workouts determines the rational and effective consumption of energy sources due to the optimal combination of carbohydrate and fat consumption during continuous running. In

order to achieve such an effective energy distribution, it is desirable to train the ability of runner's body to accelerate oxidation of fat substances aiming at providing energy for the muscles while running.

**Conclusion.** Physical performance for successful overcoming of the marathon distance can be improved by activating aerobic energy supply processes, i.e. by saving the glycolytic contribution of energy products, which can be achieved by hard training.

**Keywords:** endurance, marathon, energy exchange, aerobic performance, energy supply systems.

Длительная беговая работа, несомненно, является самым важным компонентом в тренировочной деятельности марафонцев. Энергетическое обеспечение организма бегуна во время продолжительной работы имеет некоторые характеристики, исследование которых является одной из актуальных задач для совершенствования и оптимизации подготовки бегунов-стайеров и марафонцев [1, 2]. Построение обоснованной тренировочной и соревновательной деятельности возможно только при хорошем понимании принципов энергообеспечения организма. Целью данной обзорной статьи является подробное рассмотрение и характеристика особенностей энергоснабжения в организме марафонцев.

В человеческом организме существуют различные способы энергопроизводства, каждый из которых имеет соответствующие достоинства и недостатки. Как известно, главной энергетической единицей человеческого организма является молекула аденозинтрифосфорной кислоты (АТФ), химическая энергия которой инициирует взаимодействия миофибрилл и актиновых частей (миофибрилл мышечных волокон) [3]. АТФ хранится в ограниченных количествах в мышечных клетках, и для того чтобы мышцы могли работать с определенной скоростью, скорость подачи АТФ должна быть равна скорости её потребления. При продолжительной мышечной работе запасы АТФ расходуются в течение 2-3 секунд. В связи с этим при продолжительной беговой деятельности интенсивно работают механизмы ресинтеза АТФ из АДФ и фосфата. Концентрация АТФ в мышцах является относительно постоянной величиной из-за ее непрерывного ресинтеза ферментами биологического окисления. Эти окислительно-восстановительные реакции протекают в митохондриальных системах клеток, являющихся энергетическими «платформами» всех живых систем. Как известно, существует три системы

ресинтеза энергии [4]. Анаэробная алактатная система – самая высокоскоростная система ресинтеза АТФ, действующая без участия кислорода и без синтеза лактата. Преимущество данной системы заключается в том, что креатинфосфат достаточно легко и быстро отдает свою фосфатную группу на АДФ. Анаэробная лактатная система потребляет углеводы (глюкозу) и в зависимости от скорости бега производит большое количество лактата. Аэробная (кислородная) система действует при отсутствии кислородного долга, производит полное окисление углеводов, жиров и ограниченного количества белков до конечных продуктов [5].

Аэробные механизмы работы являются ключевыми и определяющими для марафонского бега. Энергообеспечение во время преодоления марафона характеризуется «сотрудничеством» между мышцами, печенью и жировой тканью [6]. Гликоген печени поставляет мышечный гликоген, который может функционировать в качестве «хранилища» энергии. Однако общий объем гликогена в организме (103 моль АТФ в лучшем случае) недостаточен для обеспечения 150 моль АТФ, необходимых для интенсивного 2-часового бега. Рекордное число молекул АТФ может быть синтезировано за счет процессов окисления жирных кислот, которые образовались в результате расщепления жировых молекул. Однако в данном случае конечная скорость образования АТФ меньше, чем при гликогенолизе, и более чем в десять раз меньше, чем при гидролизе креатинфосфата.

Аэробная жировая мощность представляет собой показатель скорости сжигания жиров в митохондриях и выражается как количество жиров, потребляемое мышечными тканями для получения энергии в минуту. Беговая мышечная деятельность, направленная на повышение расщепления жировых молекул, предоставляет организму бегуна-марафонца возможность закрепить способность поддерживать высокую

скорость бега за счет экономизации гликогеновых ресурсов. Общий объем энергии, полученной с использованием углеводов, удовлетворит большую долю энергетического запроса организма марафонцев. В связи с этим мышечные клетки сжигают определенную долю липидов, поэтому процент окисления липидов во время марафонского бега и время преодоления всей дистанции находятся в прямой зависимости друг от друга [7-9].

У элитных марафонцев усиление расщепления жиров наступает уже во время предсоревновательной разминки за счет повышения концентрации гормонов, влияющих на мобилизацию жира (глюкагон, адреналин, норадреналин и др.). Жиры и продукты их расщепления (жирные кислоты) с помощью альбуминов плазмы крови поступают к местам их окисления, а именно в митохондрии мышечных клеток [7, 8]. Молекулы жирных кислот при этом преобразуются в ацетил-кофермент А, и затем происходит образование эфиров с карнитинном [10]. Поэтому карнитин является важным кофактором в катаболизме жиров в качестве источника энергии [11-13]. При тренировках с интенсивностью, составляющей от 70 до 80% максимального поглощения кислорода (МПК), опытный марафонец будет использовать жиры как мышечное топливо в большей степени, чем неподготовленный бегун, что связано с адаптивными изменениями в ферментном compleменте митохондрий [14]. Экспериментальные данные, полученные в результате исследований на животных, показывают, что использование жиров в качестве «топлива» оказывает падающее влияние на хранилище гликогена в мышцах [15]. Возможно, что любые шаги, предпринятые для облегчения окисления жиров, такие как добавление карнитина, могут благотворно влиять на выносливость [16].

Жирные кислоты могут окисляться для синтеза АТФ только в аэробных условиях, т.е. при отсутствии кислородного долга. При этом синтез АТФ протекает при аэробном окислении, что сопряжено с образованием энергии анаэробными системами. В марафонском беге данное сопряжение анаэробной и аэробной систем может быть представлено следующим образом. При достаточно высокой скорости (приблизительно три минуты за один километр) на начальном от-

резке марафонской дистанции ресинтез АТФ происходит с участием анаэробных механизмов энергообеспечения по креатинфосфатному (алактатному) и гликолитическому (лактатному) путям. По истечении 1-2 минут мышечные клетки полностью обеспечиваются кислородом и затраты энергии восполняются исключительно за счёт аэробного процесса.

Зависимости аэробной и анаэробной производительности от длины дистанции имеют противоположную направленность [17-19]. Каждый бегун преодолевает определенную дистанцию с определенной скоростью, соответствующей процентам от МПК. При этом аэробная система не может производить энергию для поддержания одинакового уровня скорости на всех дистанциях. Если бегун на средние и длинные дистанции пробегает 1500 метров с интенсивностью 100% от своего МПК, то на дистанции 5000 метров данный показатель составляет 95%, а на дистанции 10000 метров – 90%. Одной из причин того, что организм бегуна-марафонца не может функционировать при высоких показателях аэробного синтеза АТФ на протяжении всей марафонской дистанции, является то, что при продолжительном беге содержание гликогена мышц постепенно снижается, что приводит к формированию команды мозга на снижение бегового темпа. Невысокое содержание гликогена и глюкозы в плазме крови во время интенсивной нагрузки активизирует повышение концентрации глюкагона по отношению к инсулину, что индуцирует липолиз и освобождение жирных кислот из жировых резервов. В интенсивно работающей мышце жирные кислоты активно окисляются до главного «топлива» – ацетил-кофермента А, который «сгорает» с образованием диоксида углерода и воды. Высокое содержание ацетил-кофермента А частично подавляет углеводный обмен, уменьшая поток пирувата в цикл лимонной кислоты путем ингибирования превращения пирувата в ацетил-кофермент А [20]. Это предотвращает полное истощение гликогена, но одновременно снижает энергоэффективность использования кислорода.

Значительное влияние на способность организма к утилизации жиров во время марафонского бега оказывают показатели МПК и по-

рога анаэробного обмена. Высокие значения МПК и анаэробного порога указывают на хорошую способность организма использовать жирные молекулы для ресинтеза АТФ [21, 22]. Для максимального потребления жирных ресурсов организма на повышение энергетических затрат во время длительной тренировочной или соревновательной деятельности первостепенное значение имеет интенсивность беговой нагрузки [23]. Высокая скорость на начальном этапе беговой работы приведет к тому, что для обеспечения энергией организма в большей степени будет использоваться гликоген, а не жиры. Поскольку в отличие от запасов мышечного гликогена жирные резервы фактически неограничены, для успешного преодоления марафонской дистанции большое значение имеет «гликогеновая экономия», имеющая место при оптимальном темпе бега с высокой скоростью утилизации жира для сохранения гликогена.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отличительной особенностью тренировочной программы для подготовки к марафонской дистанции является аэробный режим

энергообеспечения мышечной деятельности. Аналогично во время соревновательной деятельности основным механизмом получения энергии в течение большей части марафона является аэробный режим. Изменение скорости бега на конечном участке дистанции приводит к «переключению» организма бегуна на анаэробный режим. Следовательно, для успешного преодоления марафонской дистанции необходимо приобретать хорошую выносливость за счет длительных беговых тренировок, которые также положительно влияют на способность мышечных волокон накапливать гликоген. Исчерпание гликогеновых депо посредством продолжительных аэробных нагрузок стимулирует мышечные волокна к приросту гликогена, что рассматривается как адаптационный механизм, который может обезопасить организм марафонца от повторного опустошения гликогеновых запасов. Таким образом, постепенное увеличение дистанций продолжительных тренировок приводит к увеличению углеводных запасов спортсмена, а во время бега их расход снижается благодаря окислению жирных молекул.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Barnes, K. R. Strategies to improve running economy / K. R. Barnes, A. E. Kilding // *Sports Medicine*. – 2014. – 45. – P. 37-56.
- Lacour, J.-R. Factors affecting the energy cost of level running at submaximal speed / J.-R. Lacour, M. Bourdin // *European Journal of Applied Physiology*. – 2015. – 115. – P. 651-673.
- Lipková, J. Mitochondrial bioenergetics of skeletal muscles / J. Lipková. // *Mitochondrial Medicine: Mitochondrial Metabolism, Diseases, Diagnosis and Therapy*. Bratislava : Springer, 2008. – P. 189-200.
- Chernyak, N. B. Processes of formation and utilisation of energy in human blood platelets / N. B. Chernyak // *Clinica Chimica Acta*. – 1965. – 12. – P. 244-257.
- Martinez, S. Energy, macronutrient and water intake during a mountain ultramarathon event: The influence of distance / S. Martinez, A. Aguilo, L. Rodas, L. Lozano, C. Moreno, P. Tauler // *Journal of Sports Sciences*. – 2017. – P. 1-7.
- Sperlich, B. Marathon Running: Physiology, Psychology, Nutrition and Training Aspects / B. Sperlich // *Physiological aspects of marathon running*. – 2016. – P. 1-12.
- Арселли, Э. Тренировка в марафонском беге: научный подход / Э. Арселли, Р. Канова. – М. : Изд-во Терра-Спорт, 2000. – 70 с.
- Traiperm, N. Energy metabolism, liver and kidney function in adolescent marathon runners / N. Traiperm, H. Gatterer, P. Pariwat, M. Burtscher // *European Journal of Clinical Investigation*. – 2016. – 46(1). – P. 27-33.
- Yeo, W. K. Fat adaptation in well-trained athletes: effects on cell metabolism / W. K. Yeo, A. L. Carey, L. Burke, L. L. Spriet, J. A. Hawley // *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*. – 2011. – 36. – P. 12–22.
- Hisahara, S. A heterozygous missense mutation in adolescent-onset very long-chain acyl-coa dehydrogenase deficiency with exercise-induced rhabdomyolysis / S. Hisahara, T. Matsushita, H. Furuyama, G. Tajima, Y. Shigematsu, T. Imai, S. Shimohama // *Tohoku Journal of Experimental Medicine*. – 2015. – 235(4). – P. 305-310.
- Eynon, N. The champions' mitochondria: is it genetically determined? A review on mitochondrial DNA and elite athletic performance / N. Eynon, M. Morán, R. Birk, A. Lucia // *Physiological Genomics*. – 2011. – 43. – P. 789-798.
- Stephens, F. B. New insights concerning the role of carnitine in the regulation of fuel metabolism in skeletal muscle / F. B. Stephens, D. Constantin-Teodosiu, P. L. Greenhaff // *The Journal of Physiology*. – 2007. – 581. – P. 431–444.
- Рылова, Н. В. Особенности энергообмена у юных спортсменов / Н. В. Рылова, А. А. Биктимирова // *Практическая медицина*. – 2013. – С. 30-34.
- Holloszy, J. O. Biochemical adaptations to endurance exercise in muscle. / J. O. Holloszy, F. W. Booth // *Annual Review of Physiology*. – 1976. – 38. – P. 273-291.
- Rennie, M. J. A sparing effect of increased plasma fatty

- acids on muscle and liver glycogen content in the exercising rat / M.J. Rennie, W.W. Winder, J. O. Holloszy // *Biochemical Journal*. – 1976. – 156. – P.647-655.
16. Cooper, M. B. The effect of marathon running on carnitine metabolism and on some aspects of muscle mitochondrial activities and antioxidant mechanisms / M. B. Cooper, D.A. Jones, R. H. Edwards, G. C. Corbucci, G. Montanari, C. Trevisani // *Journal of Sports Sciences*. – 1986. – 4. – P.79-87.
  17. Duffield, R. Energy system contribution to 100-m and 200-m track running events / R. Duffield, B. Dawson, C. Goodman // *Journal of Science and Medicine in Sport*. – 2004. – 7. – P.302–313.
  18. Duffield, R. Energy system contribution to 400-metre and 800-metre track running events / R. Duffield, B. Dawson, C. Goodman // *Journal of Science and Medicine in Sport*. – 2005. – 23. – P.299–307.
- LIST OF REFERENCES**
1. Barnes, K. R. Strategies to improve running economy / K. R. Barnes, A. E. Kilding // *Sports Medicine*. – 2014. – 45. – P. 37-56.
  2. Lacour, J.-R. Factors affecting the energy cost of level running at submaximal speed / J.-R. Lacour, M. Bourdin // *European Journal of Applied Physiology*. – 2015. – 115. – P. 651-673.
  3. Lipková, J. Mitochondrial bioenergetics of skeletal muscles / J. Lipková. – *Mitochondrial Medicine: Mitochondrial Metabolism, Diseases, Diagnosis and Therapy*. – Bratislava : Springer, 2008. – P. 189-200.
  4. Chernyak, N. B. Processes of formation and utilisation of energy in human blood platelets / N. B. Chernyak // *Clinica Chimica Acta*. – 1965. – 12. – P. 244-257.
  5. Martinez, S. Energy, macronutrient and water intake during a mountain ultramarathon event: The influence of distance / S. Martinez, A. Aguilo, L. Rodas, L. Lozano, C. Moreno, P. Tauler // *Journal of Sports Sciences*. – 2017. – P.1-7.
  6. Sperlich, B. Marathon Running: Physiology, Psychology, Nutrition and Training Aspects / B. Sperlich // *Physiological aspects of marathon running*. – 2016. – P.1-12.
  7. Arsell, E. Training in marathon running: a scientific approach / E. Arsell, R. Kanova // - M. : Terra-Sport Publishing House. – 2000. – 70 p.
  8. Traiperm, N. Energy metabolism, liver and kidney function in adolescent marathon runners. / N. Traiperm, H. Gatterer, P. Pariwat, M. Burtcher // *European Journal of Clinical Investigation*. – 2016. – 46(1). – P. 27-33.
  9. Yeo, W. K. Fat adaptation in well-trained athletes: effects on cell metabolism / W. K. Yeo, A. L. Carey, L. Burke, L. L. Spriet, J. A. Hawley // *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*. – 2011. – 36. – P. 12-22.
  10. Hisahara, S. A heterozygous missense mutation in adolescent-onset very long-chain acyl-coa dehydrogenase deficiency with exercise-induced rhabdomyolysis. / S. Hisahara, T. Matsushita, H. Furuyama, G. Tajima, Y. Shigematsu, T. Imai, S. Shimohama // *Tohoku Journal of Experimental Medicine*. – 2015. – 235(4). – P. 305-310.
  11. Eynon, N. The champions' mitochondria: is it genetically determined? A review on mitochondrial DNA and elite athletic performance / N. Eynon, M. Morán, R. Birk, A. Lucia // *Physiological Genomics*. – 2011. – 43. – P. 789-798.
  12. Stephens, F. B. New insights concerning the role of carnitine in the regulation of fuel metabolism in skeletal muscle / F.B. Stephens, D. Constantin-Teodosiu, P. L. Greenhaff // *The Journal of Physiology*. – 2007. – 581. – P.431-444.
  13. Rylova, N. V. Features of energy exchange of young athletes / N. V. Rylova, A. A. Biktimirova // *Practical medicine*. – 2013. – P.30-34.
  14. Holloszy, J. O. Biochemical adaptations to endurance exercise in muscle / J. O. Holloszy, F. W. Booth // *Annual Review of Physiology*. – 1976. – 38. – P. 273-291.
  15. Rennie, M. J. A sparing effect of increased plasma fatty acids on muscle and liver glycogen content in the exercising rat / M. J. Rennie, W. W. Winder, J. O. Holloszy // *Biochemical Journal*. – 1976. – 156. – P. 647-655.
  16. Cooper, M. B. The effect of marathon running on carnitine metabolism and on some aspects of muscle mitochondrial activities and antioxidant mechanisms / M. B. Cooper, D. A. Jones, R. H. Edwards, G. C. Corbucci, G. Montanari, C. Trevisani // *Journal of Sports Sciences*. – 1986. – 4. – P.79-87.
  17. Duffield, R. Energy system contribution to 100-m and 200-m track running events / R. Duffield, B. Dawson, C. Goodman // *Journal of Science and Medicine in Sport*. – 2004. – 7. – P. 302-313.
  18. Duffield, R. Energy system contribution to 400-metre and 800-metre track running events / R. Duffield, B. Dawson, C. Goodman // *Journal of Science and Medicine in Sport*. – 2005. – 23. – P. 299-307.
  19. Duffield, R. Energy system contribution to 1500- and 3000-metre track running events / R. Duffield, B. Dawson, C. Goodman // *Journal of Science and Medicine in Sport*. – 2005. – 23. – P.993-1002.
  20. Berg, J. M. *Biochemistry* / J. M. Berg, J. L. Tymoczko, L. Stryer. – New York : W. H. Freeman and Company, 5th edition, 2002.
  21. Brueckner, J. C. The energy cost of running increases with the distance covered / J. C. Brueckner, G. Atchou, C. Capelli, A. Duvallet, D. Barrault, E. Jouselin, M. Rieu, P. E. di Prampero // *European Journal of Applied Physiology*. – 1991. – 62. – P. 385-389.
  22. Kyröläinen, H. Effects of marathon running on running economy and kinematics. / H. Kyröläinen, T. Pullinen, R. Candau, J. Avela, P. Huttunen, P.V. Komi // *European Journal of Applied Physiology*. – 2000. – 82. – P. 297-304.