

Научная статья

УДК 575:796+612.017.2:796

Экспрессия генов как показатель долговременной адаптации к физической нагрузке

А. О. Зайцева^{1✉}, М. О. Аксенов^{1,2}

¹Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова, Россия, 670000, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Смолина, д. 24а

²Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова, Россия, 117997, г. Москва, Стремянный пер., д. 36

Зайцева Анна Олеговна, аспирант кафедры теории физической культуры, zaytseva_annot@mail.ru,

<https://orcid.org/0000-0003-4678-4261>

Аксенов Максим Олегович, доктор педагогических наук, ¹заведующий лабораторией спортивной генетики,

²профессор кафедры физического воспитания, aksenov.mo@rea.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0079-5750>

Аннотация. Для достижения высокого результата в ходе спортивной подготовки организму спортсмена необходимо постоянно адаптироваться все к большим тренировочным нагрузкам. Такие тренировки постоянно вызывают изменение состава и свойств биологической системы организма. Актуальность исследования обусловлена необходимостью использования генетических тестирований как в спортивном отборе, так и в спортивной подготовке атлетов разных дисциплин. Цель исследования – определить генотипы, которые ассоциированы с повышением работоспособности и здоровья спортсмена. В ходе анализа литературных источников были определены некоторые генетические маркеры, ответственные за физические способности человека. Также в статье представлены результаты научных исследований, отражающие механизмы адаптации организма к физическим нагрузкам.

Ключевые слова: спортивная генетика, тренировочная нагрузка, адаптация организма

Благодарности и финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Бурятского государственного университета им. Д. Банзарова в рамках научного проекта № 21–08–0502.

Для цитирования: Зайцева А. О., Аксенов М. О. Экспрессия генов как показатель долговременной адаптации к физической нагрузке // Физическое воспитание и студенческий спорт. 2022. Т. 1, вып. 2. С. 183–188. <https://doi.org/10.18500/2782-4594-2022-1-2-183-188>, EDN: DRLWFF

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Gene expression as an indicator of long-term adaptation to physical activity

A. O. Zaytseva^{1✉}, M. O. Aksenov^{1,2}

¹Banzarov Buryat State University, 24a Smolina St., Ulan-Ude 670000, Republic of Buryatia, Russia

²Plekhanov Russian University of Economics, 36 Stremyanny Lane, Moscow 117997, Russia

Anna O. Zaytseva, zaytseva_annot@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4678-4261>

Maksim O. Aksenov, aksenov.mo@rea.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0079-5750>

Abstract. In order to achieve a high result in the course of sports training, the athlete's body needs to constantly adapt to larger and larger training loads. Such trainings cause constant changes in the composition and properties of the biological system of the body. The relevance of the study is due to the need to use genetic testing both in sports selection and in sports training of athletes of different disciplines. The purpose of the study is to determine the genotypes that are associated with an increase in the performance and health of an athlete. During the analysis of scholarly researches on the subject some genetic markers affecting a person's physical abilities were identified. The article also presents the results of scientific research reflecting the mechanisms of adaptation of the body to physical exertion.

Keywords: sports genetics, training load, adaptation of the body

Acknowledgments. The Banzarov Buryat State University as part of a scientific project No. 21-08-0502 supported this work.

For citation: Zaytseva A. O., Aksenov M. O. Gene expression as an indicator of long-term adaptation to physical activity. *Physical Education and University Sport*, 2022, vol. 1, iss. 2, pp. 183-188 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/2782-4594-2022-1-2-183-188>, EDN: DRLWFF

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC0-BY 4.0)

Введение

На сегодняшний день в тренировочном процессе спортсменов широко используются генетические исследования. Индивидуальные генетические данные позволяют выявить предрасположенность к какой-либо нагрузке и к развитию определенных физических способностей [1]. Гены, отвечающие за физические качества человека, играют важнейшую роль во всех физиологических процессах [2].

Проведенные масштабные исследования доказывают, что генетический код не в полной мере объясняет различия в физической силе и состоянии здоровья [3]. В ходе изучения последних исследований были выявлены данные о выраженном влиянии физической активности на уровень работы генов. Уровень адаптации к нагрузке зависит не только от определенного генотипа, но и от уровня экспрессии генов, интенсивность которых зависит от индивидуальности спортсмена и от применения определенных видов нагрузки. Для построения эффективного тренировочного процесса необходимо определение уровня экспрессии генов.

Эпигенетика предлагает новый подход в поиске обоснований изменений работоспособности тренировочной адаптации на протяжении всей спортивной карьеры. Под эпигенетикой понимаются изменения в ДНК, не касающиеся ее базовой последовательности. Исследования [4] доказывают, что спортсмены с одинаковым генотипом по-разному адаптируются к физической нагрузке, что позволяет сравнить успешность спортсменов и определить индивидуальную методику тренировочного процесса.

Одним из основных показателей функционального состояния спортсмена, определяющих аэробные возможности, является максимальное потребление кислорода (МПК). Одним из генов, отвечающих за этот показатель, является ген EPAS1, белок которого входит в гетеродимерный транскрипционный комплекс HIF-1 [5], участвующий в молекулярных

реакциях, влияющих на усиление ангиогенеза, эритропоэза, метаболических изменений, способствующих увеличению доставки кислорода к мышцам. Несмотря на огромную роль генов, участвующих в процессе доставки и потребления кислорода, влияние полиморфизмов этого гена изучено крайне мало [6]. МПК во многом определяет спортивный результат в беге на выносливость. Данные, полученные на близнецовых исследованиях, указывают, что в том числе и показатель МПК до 50% обусловлен генетическими факторами [7, 8].

Материалы и методы

Для сбора и анализа материала использовался поиск научной литературы, международных и отечественных публикаций, освещающих тему исследования, опубликованных в разных базах (PUBMED, MEDLINE, CINAL, SCOPUS, SportDiscuss). В дальнейшем полученные данные были подробно изучены и систематизированы по общим направлениям, связанным с физической подготовкой спортсменов.

Исходя из научных данных [2], определены гены, которые отвечают за физические способности человека, но в ходе исследований было установлено, что факторы внешней среды могут влиять на работу генов [9]. А именно, физическая работа активизирует функционирование целого ряда генов, что выражается в повышении или понижении уровня соответствующего фермента после физической активности. Данные механизмы позволяют раскрыть перестройки регуляторных процессов, отвечающие за работу генов.

Такой взгляд позволяет по-новому оценить концепцию спортивной подготовки. Активация всех элементов, выполняющих регуляторные, стимулирующие и проективные функции, высокий уровень синтеза и секреции новых клеток существенно отличают регуляцию метаболизма при физической работе. Адаптационные перестройки, происходящие в генетической системе при эффективных физических нагрузках, носят комплексный харак-

тер и затрагивают все этапы регуляции уровня генетической экспрессии.

Результаты и их обсуждение

Результаты проведенного анализа позволили определить несколько ключевых аспектов. Особый интерес представляет механизм адаптационных перестроек при систематической физической нагрузке, ведущей к активизации работы целого ряда генов. Физическая активность вызывает существенную перестройку генетической системы, проявляющуюся прежде всего в долговременной адаптации к внешним воздействиям. Исследование [9] доказывает, что мышцы обладают эпигенетической памятью. Важная роль в адаптационных перестройках метаболизма при варьировании физической нагрузки принадлежит активации работы генов, отвечающих за процессы регуляторных механизмов.

Процесс работы генов влияет на усвоение питательных веществ, что сказывается на сократительных способностях мышц [8, 10–13]. Эта адаптивная способность указывает на различия в фенотипе мышц (например, скорости сокращения, митохондриального содержимого и площади поперечного сечения мышц), которые способствуют физической работоспособности.

Тренировки на выносливость и силу представляют собой дивергентные стимулы, вызывающие определенные изменения, которые служат для минимизации клеточного стресса на последующих аналогичных тренировках [10]. Тренировки на выносливость вызывают метаболические и морфологические реакции [12, 14], включая митохондриальный биогенез [13], быстрое и медленное преобразование фенотипа волокон, снижение зависимости от углеводного топлива во время субмаксимальных упражнений [15] и улучшение аэробной способности (МПК, VO_{2max}).

Напротив, силовые тренировки оказывают минимальное влияние на митохондриальный биогенез или паттерны метаболизма субстрата, но увеличивают синтез белка и гипертрофию, которые способствуют увеличению максимальной выходной силы по сравнению с тренировками на выносливость [16].

Следовательно, вызванная физическими упражнениями адаптация как к тренировкам на выносливость, так и к силовым тренировкам является важным фактором для улучшения

метаболического здоровья и для поддержания функциональных способностей. Стрессовая тренировка стимулирует многочисленные внутриклеточные сигналы, активация которых длится от нескольких секунд до нескольких часов после прекращения каждой сократительной схватки [13, 14]. Эти сигналы в конечном итоге приводят к изменению профиля экспрессии генов, которые специфичны для стресса, вызванного тренировкой [12, 13].

Впоследствии экспрессия генов возвращается к уровням, предшествующим физической нагрузке, пока тренировочная работа не повторится вновь, но уже с увеличением силы воздействия. Долговременная адаптация к тренировкам, скорее всего, представляет собой совокупность многих тренировочных воздействий, приводящих к кумулятивным, глобальным изменениям в экспрессии генов и белков и, в конечном счете, к отчетливым фенотипическим изменениям, наблюдаемым после длительных периодов силовой тренировки или тренировки на выносливость.

Возможно, что экспрессия ключевых генов или группы генов, которые отвечают за активность генетической системы после тренировочной нагрузки, изменяется у спортсменов по сравнению с людьми, не занимающимися спортом. Такая модель была предложена М. Fluck [17], но обоснованность этой модели еще предстоит проверить экспериментально с использованием глобального анализа экспрессии генов при использовании различных тренировочных воздействий.

Во многих зарубежных исследованиях используются генные микрочипы, с помощью которых изучаются быстрые и долговременные изменения в профилях экспрессии генов здоровых, стареющих (больных) мышц, которые позволяют в короткие сроки определить основные генетические изменения, ответственные за определенные болезненные состояния.

Например, исследование [18] показало, что тренировка с определенным видом нагрузки приводит к изменению характера транскрипции в мышечных волокнах, что указывает на новую генетическую «точку отсчета». В частности, результаты исследования подтвердили, что при правильно подобранном тренировочном воздействии возможно усилить работу генов, отвечающих за те или иные качества. Зная, что белки, кодируемые этими генами, имеют четко определенные функции и эффективно адаптируются к нагрузке, можно предположить, что это способствует повыше-

нию работоспособности и предупреждению перетренированности.

Следует отметить, что мы не можем сбрасывать со счетов компонент врожденных генетических данных, которые предрасполагают к развитию определенных физических способностей. Однако обнаружение изменений в экспрессии генов позволяет влиять на работу генов посредством физической нагрузки.

Аэробная нагрузка регулирует работу генов, отвечающих за митохондриальную структуру, окислительный метаболизм, кроме этого корректирует генетическую активность группы генов, отвечающих за расщепление жиров в организме. В свою очередь, анаэробная нагрузка стимулирует передачу сигналов клеткам, которые способствуют росту мышечных волокон и улучшению работы алактатных механизмов.

Это говорит о том, что существуют аспекты биосинтеза белка, которые важны для различных видов адаптационных процессов, зависящих от режимов тренировочных воздействий. Например, в мышцах высококвалифицированных спортсменов биосинтез белка увеличивается в состоянии покоя, что говорит о долговременной адаптации и готовности организма выполнять большую нагрузку. Регулярные силовые тренировки изменяют экспрессию генов скелетных мышц, способствуя синтезу белка и гипертрофии, таким образом, поддерживая фенотип для увеличения мышечной силы [1]. Фенотип спортсменов, который указывает на предрасположенность к выносливости, имеет тесную связь с митохондриальным биогенезом, улучшением снабжения кислородом и энергетическим обменом. Группы генов, указывающие на долговременную активацию генов, ассоциированных с физической нагрузкой, обеспечивают энергией метаболизма во время выполнения работы на выносливость. Однако следует отметить, что Yang и др. [19] измерили активность генов через 24 часа после применения нагрузки и обнаружили, что все гены, участвующие в работе на выносливость, вернулись к уровню покоя после этого времени.

Результаты исследования [20] доказывают мнение о том, что работа генов изменяется после длительной спортивной подготовки (более 8 лет). Вероятнее всего, это связано с тем, что специальная нагрузка тонко регулирует работу многочисленных генов посредством модуляции процессов, которые контролируют деградацию мРНК как долговременный

адаптационный механизм, чтобы справиться с последующей нагрузкой.

Биосинтез белка, который важен для специфических процессов, подтверждает данные о том, что существуют долговременные изменения экспрессии генов в результате определенных режимов тренировки. Например, биосинтез белка увеличивается в мышцах высококвалифицированных спортсменов в состоянии покоя. Это говорит о том, что генетическая система спортсмена подготавливает организм к выполнению последующей еще большей нагрузки.

Выводы

Адаптация к тренировкам – это сложный процесс, который зависит от факторов окружающей среды и генетических факторов. Генетическое тестирование оказывает огромное влияние на выбор вида спорта, вид физической нагрузки, на многие физические аспекты в спорте высших достижений.

На сегодняшний день идет активная работа по исследованию генетической системы. Многими учеными доказана изменчивость работы генов, что характеризуется адаптацией мышц к различным воздействиям – таким, как стресс окружающей среды, тренировочные нагрузки разного характера. Существенным недостатком этих опытов является отсутствие комплексного анализа активности генов в зависимости от физической нагрузки. Кроме этого, ограничением возможности оценить вклад работы генов в адаптационные процессы при физической работе является полное отсутствие данных, характеризующих отличия в их функционировании у высококвалифицированных спортсменов: эти отличия могут охарактеризовать ключевые звенья генетических данных, определяющие работоспособность и выносливость.

В спортивной и функциональной генетике огромное внимание уделяется поиску тех ключевых факторов регуляции метаболизма, воздействие на которые позволит значительно улучшить спортивный результат и облегчить переносимость физической работы организмом.

Список литературы

1. Аксенов М. О. Генетические технологии и генный допинг в спорте высших достижений // Стратегии и практики развития инновационных видов спорта : опыт поколений и новые технологии: материалы международного научного симпозиума (1–3 июля 2015 г., Улан-Удэ). Улан-Удэ : БГУ, 2018. С. 84–89.

2. Ахметов И. И. Молекулярная генетика спорта: монография. М.: Советский спорт, 2009. 268 с.
3. Bloch W., Zimmer P. Epigenetik und Sport // *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*. 2012. № 6 (63). S. 163–167.
4. Моссэ И. Б. Генетика спорта: вчера, сегодня, завтра // *Труды Белорусского государственного университета*. 2012. Т. 7, ч.1. С. 56–68.
5. Majmundar A. J., Wong W. J., Simon M. C. Hypoxia in decibel factors and the response to hypoxic stress // *Molecular Cell*. 2010. Vol. 40, № 2. P. 294–309.
6. Bentley D. J., Newell J., Bishop D. Incremental exercise test design and analysis: implications for performance diagnostics in endurance athletes // *Sports Med*. 2007. Vol. 37, № 7. P. 575–586.
7. Bouchard C., An P., Rice T., Skinner J. S., Wilmore J. H., Gagnon J., Pérusse L., Leon A. S., Rao D. C. Familial aggregation of VO₂max response to exercise training: Results from the HERITAGE family study // *Journal of Applied Physiology*. 1999. Vol. 87, № 3. P. 1003–1008.
8. Herman F. C. Applied physiology of rowing F. C. Herman // *Sports Med*. 1984. Vol. 1, № 4. P. 303–326.
9. Seaborne R. A., Strauss J., Cocks M., Shepherd S., O'Brien T. D., Someren K. A. van, Bell P. G., Murgatroyd C., Morton J. P., Stewart C. E., Sharples A. P. Human Skeletal Muscle Possesses an Epigenetic Memory of Hypertrophy // *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8, № 1. P. 1898.
10. Arkinstall M. J., Tunstall R. J., Cameron-Smith D., Hawley J. A. Regulation of metabolic genes in human skeletal muscle by short-term exercise and diet manipulation // *American Journal of Physiology, Endocrinology and Metabolism*. 2004. Vol. 287, № 1. P. E25–31.
11. Booth F. W., Thomason D. B. Molecular and cellular adaptations of muscle in response to exercise: perspectives of various models // *Physiological Reviews*. 1991. Vol. 71, № 2. P. 541–585.
12. Hawley J. A., Stepto N. K. Adaptations to training in endurance cyclists: implications for performance // *Sports Med*. 2001. Vol. 31, № 7. P. 511–520.
13. Adhietty P. J., Irrcher I., Joseph A. M., Ljubicic V., Hood D. A. Plasticity of skeletal muscle mitochondria in response to contractile activity // *Experimental Physiology*. 2003. Vol. 88. P. 99–107.
14. Hawley J. A. Adaptations of skeletal muscle to prolonged, intense endurance training // *Clinical and Experimental Pharmacology and Physiology*. 2002. Vol. 29. P. 218–222.
15. Holloszy J. O., Rennie M. J., Hickson R. C., Conlee R. K., Hagberg J. M. Physiological consequences of the biochemical adaptations to endurance exercise // *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1977. Vol. 301. P. 440–450.
16. Hickson R. C. Interference of strength development by simultaneously training for strength and endurance // *European Journal of Applied Physiology*. 1980. Vol. 45. P. 255–263.
17. Fluck M. Functional, structural and molecular plasticity of mammalian skeletal muscle in response to exercise stimuli // *Journal of Experimental Biology*. 2006. Vol. 209. P. 2239–2248.
18. Fluck M., Dapp C., Schmutz S., Wit E., Hoppeler H. Transcriptional profiling of tissue plasticity: Role of shifts in gene expression and technical limitations // *Journal of Applied Physiology*. 2005. Vol. 99. P. 397–413.
19. Yang Y., Creer A., Jemiolo B., Trappe S. Time course of myogenic and metabolic gene expression in response to acute exercise in human // *Journal of Applied Physiology*. 2005. Vol. 98. P. 1745–1752
20. Stepto N., Coffey V., Carey A., Ponnampalam A., Canny B., Powell D., Hawley J. Global gene expression in skeletal muscle from well-trained strength and endurance athletes // *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 2009. Vol. 41, № 3. P. 546–565.

References

1. Akseov M. O. Genetic technologies and gene doping in high-performance sports. In: *Strategii i praktiki razvitiya innovatsionnyh vidov sporta: opyt pokolenij i novye tehnologii: materialy mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma, 1–3 ijulja 2015 g.* [Strategies and practices for the development of innovative sports: Generational experience and new technologies: proceedings of the International Scientific Symposium, July 1–3, 2015]. Ulan-Ude, BSU, 2018, pp. 84–89 (in Russian).
2. Akhmetov I. I. *Molekuljarnaja genetika sporta: monografija* [Molecular genetics of sports: a monograph]. Moscow, Soviet Sport Publ., 2009. 268 p. (in Russian).
3. Bloch W., Zimmer P. Epigenetik und Sport. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 2012, no. 6 (63), S. 163–167.
4. Mossje I. B. Sports genetics: Yesterday, today, tomorrow. *Proceedings of the Belarusian State University*, 2012, vol. 7, part 1, pp. 56–68 (in Russian).
5. Majmundar A. J., Wong W. J., Simon M. C. Hypoxia in decibel factors and the response to hypoxic stress. *Molecular Cell*, 2010, vol. 40, no. 2, pp. 294–309.
6. Bentley D. J., Newell J., Bishop D. Incremental exercise test design and analysis: implications for performance diagnostics in endurance athletes. *Sports Med*, 2007, vol. 37, no. 7, pp. 575–586.
7. Bouchard C., An P., Rice T., Skinner J. S., Wilmore J. H., Gagnon J., Pérusse L., Leon A. S., Rao D. C. Familial aggregation of VO₂max response to exercise training: results from the HERITAGE family study. *Journal of Applied Physiology*, 1999, vol. 87, no. 3, pp. 1003–1008.
8. Herman F. C. Applied physiology of rowing. *Sports Med.*, 1984, vol. 1, no. 4, pp. 303–326.
9. Seaborne R. A., Seaborne R. A., Strauss J., Cocks M., Shepherd S., O'Brien T. D., Someren K. A. van, Bell P. G., Murgatroyd C., Morton J. P., Stewart C. E., Sharples A. P. Human Skeletal Muscle Possesses an Epigenetic Memory of Hypertrophy. *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, no. 1, pp. 1898.
10. Arkinstall M. J., Tunstall R. J., Cameron-Smith D., Hawley J. A. Regulation of metabolic genes in human skeletal muscle by short-term exercise and diet manipulation. *American Journal of Physiology, Endocrinology and Metabolism*, 2004, vol. 287, no. 1, pp. E25–31.
11. Booth F. W., Thomason D. B. Molecular and cellular adaptations of muscle in response to exercise: perspectives of various models. *Physiological Reviews*, 1991, vol. 71, no. 2, pp. 541–585.

12. Hawley J. A., Stepto N. K. Adaptations to training in endurance cyclists: implications for performance. *Sports Med.*, 2001, vol. 31, no. 7, pp. 511–520.
13. Adhietty P. J., Irrcher I., Joseph A. M., Ljubicic V., Hood D. A. Plasticity of skeletal muscle mitochondria in response to contractile activity. *Experimental Physiology*, 2003, vol. 88, pp. 99–107.
14. Hawley J. A. Adaptations of skeletal muscle to prolonged, intense endurance training. *Clinical and Experimental Pharmacology and Physiology*, 2002, vol. 29, pp. 218–222.
15. Holloszy J. O., Rennie M. J., Hickson R. C., Conlee R. K., Hagberg J. M. Physiological consequences of the biochemical adaptations to endurance exercise. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1977, vol. 301, pp. 440–450.
16. Hickson R. C. Interference of strength development by simultaneously training for strength and endurance. *European Journal of Applied Physiology*, 1980, vol. 45, pp. 255–263.
17. Fluck M. Functional, structural and molecular plasticity of mammalian skeletal muscle in response to exercise stimuli. *Journal of Experimental Biology*, 2006, vol. 209, pp. 2239–2248.
18. Fluck M., Dapp C., Schmutz S., Wit E., Hoppeler H. Transcriptional profiling of tissue plasticity: Role of shifts in gene expression and technical limitations. *Journal of Applied Physiology*, 2005, vol. 99, pp. 397–413.
19. Yang Y., Creer A., Jemiolo B., Trappe S. Time course of myogenic and metabolic gene expression in response to acute exercise in human. *Journal of Applied Physiology*, 2005, vol. 98, pp. 1745–1752.
20. Stepto N., Coffey V., Carey A., Ponnampalam A., Canny B., Powell D., Hawley J. Global gene expression in skeletal muscle from well-trained strength and endurance athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2009, vol. 41, no. 3, pp. 546–565.

Поступила в редакцию 09.06.2022; одобрена после рецензирования 17.06.2022; принята к публикации 14.08.2022
The article was submitted 09.06.2022; approved after reviewing 17.06.2022; accepted for publication 14.08.2022