

И.М. Жугель

Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Генетическая предрасположенность к занятию спортом у подростков и юношей: обзор литературы

Контактная информация:

Жугель Илья Михайлович, ординатор кафедры пропедевтики детских болезней с курсом общего ухода за детьми Санкт-Петербургского государственного педиатрического медицинского университета

Адрес: 194100, Санкт-Петербург, ул. Литовская, д. 2, e-mail: dzugela@gmail.com

Статья поступила: 08.02.2025, принята к печати: 16.10.2025

Генетическая предрасположенность к занятиям и достижению результатов в спорте остается актуальной темой научных исследований. В обзоре рассмотрены результаты исследований генетических факторов, ассоциированных с уровнем подготовки профессиональных спортсменов, в том числе подростков и юношей, отмечены генетические маркеры и механизмы, определяющие необычные способности к занятиям различными видами спорта. Обсуждаются роль генетики человека в специфических видах спорта, таких как единоборства и циклические виды спорта, генетические аспекты психологической устойчивости спортсменов с акцентом на последние исследования в этой области. Ключевые слова: генетика, гены, спорт, психологическая устойчивость, единоборства, циклические виды спорта, подростки, юноши

Для цитирования: Жугель И.М. Генетическая предрасположенность к занятию спортом у подростков и юношей: обзор литературы. Вопросы современной педиатрии. 2025;24(5):353–360. doi: https://doi.org/10.15690/vsp.v24i5.2955

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия генетика спортсменов, добившихся высоких достижений, в том числе в сфере профессионального спорта, стала объектом многочисленных научных изысканий [1-3]. В результате обнаружено множество генов, ассоциированных со спортивными результатами [2, 4, 5]. И если первоначально, в 2005 г. с развитием определенных спортивных навыков были связаны варианты 187 генов, в 2009 г. это количество возросло до 239 [4]. К 2020 г. список генов-кандидатов был сокращен до 220 позиций по причине исключения некоторых генов из-за неубедительности результатов исследований «случай - контроль» [2]. В настоящее время установлено, что варианты 252 генов ассоциированы со статусом спортсмена: 45% связаны с выносливостью, 38% — с мощностью, 17% — с силой [1]. Кроме того, по данным ряда исследований, показано, что с высокими спортивными достижениями ассоциированы 128 генов (см. таблицу) [1, 3]. В небольшом количестве научных работ изучали психологические особенности спортсменов [6–8], а также риск возникновения травм [2, 3]. В ряде исследований участвовали подростки-спортсмены [9, 10]. С участием детей младшего возраста (до 10 лет) такие исследования не проводили.

Большинство генетических исследований классифицируют спортсменов на две группы на основе преобладающих метаболических потребностей, обусловленных тренировками или соревнованиями, — спортсмены, ориентированные на анаэробные или на аэробные нагрузки [12, 13]. Одновременно продолжаются исследования связи генетических факторов со спортивными предпочтениями и успехами в таких дисциплинах, как единоборства, циклические виды спорта. Подростки и юноши, находящиеся в стадии активного физического и гормонального развития, являются особенно важной группой для изучения этих вопросов.

Ilya M. Zhugel

Saint Petersburg State Pediatric Medical, Saint Petersburg, Russian Federation

Genetic Predisposition to Sports Activities in Adolescents and Young Men: Narrative Review

The genetic predisposition to sports activities and achieving results remains the urgent topic of scientific research. This review covers analysis results of genetic factors associated with training level among professional athletes, including adolescents and young men; notes genetic markers and mechanisms determining unusual abilities in various sports. The role of human genetics in specific activities, such as martial arts and endurance sports, genetic aspects of athletes' psychological resilience are discussed focusing on recent research in this field.

Keywords: genetics, genes, sport, psychological stability, martial arts, endurance sports, adolescents, young men

For citation: Zhugel Ilya M. Genetic Predisposition to Sports Activities in Adolescents and Young Men: Narrative Review. *Voprosy sovremennoi pediatrii* — *Current Pediatrics*. 2025;24(5):353–360. (In Russ). doi: https://doi.org/10.15690/vsp.v24i5.2955

353

Таблица. Гены предрасположенности к успешной спортивной деятельности по ключевым фенотипическим признакам [1, 3, 6, 11] **Table.** Susceptibility gene for successful sports activity by key phenotypic characteristics [1, 3, 6, 11]

Фенотипические признаки	Гены сердечно-сосудистой системы	Гены метаболизма и энергетического обмена	Гены поперечно-полосатой мышечной ткани
Быстрота реакции	ACE	PPARA, PPARG, PPARGC1	ACTN3, AMPD1
Мышечная сила	ACE	PPARA, PPARG, PPARGC1, UCP2	ACTN3, AMPD1
Выносливость	AGT, AGTR1	PPARA, PPARGC1A	ACTN3, AMPD1
Мышечная масса	ACE, NOS3, AGT, IGF1, VEGF	PPARGC1A, AMPD1, CPT1B, UCP2, MTOR, SLC2A4, CKM	ACTN3, MSTN, IGF-1, MYOD1, MYF5, MYOG, TNNT1/1/2/3
Развитие скорости и силы	ACE	PPARA, PPARG, HIF1A, AR	ACTN3

Примечание. ACE — ген, кодирующий ангиотензинпревращающий фермент; AGT — ген, кодирующий ангиотензиноген; AGTR1 — ген, кодирующий ангиотензин 2 рецептор 1; PPARA — ген, кодирующий альфа-рецептор, активируемый пролифератором пероксисом; PPARG — ген, кодирующий гамма-рецептор, активируемый пролифератором пероксисом; UCP2 — ген, кодирующий разобщающий белок 2; AR — ген, кодирующий андрогеновый рецептор; HIF1A — ген, кодирующий субъединицу альфа фактора, индуцируемого гипоксией, 1; ACTN3 — ген, кодирующий альфа-актинин-3; AMPD1 — ген, кодирующий аденозинмонофосфатдезаминазу (М-изоформу); CPT1B — ген, кодирующий карнитинпальмитоилтрансферазу 1B; MTOR — ген, кодирующий механистическую мишень рапамицина; SLC2A4 — ген, кодирующий глюкозный транспортер, тип 4; CKM — ген, кодирующий креатинкиназу мышцы; MSTN — ген, кодирующий миостатин (GDF8, ростовой фактор дифференцировки 8); IGF1 — ген, кодирующий инсулиноподобный фактор роста 1; MYOD1 — ген, кодирующий белок дифференцировки миобластов 1; MYF5 — ген, кодирующий миогенный фактор 5; MYOG — ген, кодирующий миогенный типы).

Note. ACE — gene encoding angiotensin-converting enzyme; AGT — gene encoding angiotensinogen; AGTR1 — gene encoding angiotensin 2 receptor 1; PPARA — gene encoding peroxisome proliferator-activated receptor alpha; PPARG — gene encoding peroxisome proliferator-activated receptor gamma; UCP2 — gene encoding uncoupling protein 2; AR — gene encoding androgen receptor; HIF1A — gene encoding hypoxia-inducible factor 1-alpha; ACTN3 — gene encoding alpha-actinin-3; AMPD1 — gene encoding adenosine monophosphate deaminase (M-isoform); CPT1B — a gene encoding carnitine palmitoyltransferase 1; MTOR — gene encoding mammalian target of rapamycin; SLC2A4 — gene encoding glucose transporter, type 4; CKM — gene encoding muscle creatine kinase; MSTN — gene encoding myostatin (GDF8, growth differentiation factor 8); IGF1 — gene encoding insulin-like growth factor 1; MYOD1 — gene encoding myoblast differentiation protein 1; MYF5 — gene encoding myogenic factor 5; MYOG — gene encoding myogenin; TNNT1/1/2/3 — gene encoding troponin T (slow, cardiac, fast types).

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ МАРКЕРЫ УСПЕХОВ В СПОРТЕ

Генетическая предрасположенность — понятие, характеризующее любые изменения генотипа, которые могут повлиять на фенотип, под действием негенетических факторов [14]. Изменения генотипов, ведущие к снижению или повышению экспрессии генов, могут привести к развитию патологических фенотипов в виде многофакторных заболеваний [15-17]. Однако некоторые изменения генотипов, ассоциированные, как правило, с повышенной экспрессией генов, могут привести к изменениям метаболических процессов (пластического обмена, продукции энергии), ассоциированным с большим физическим развитием организма. В совокупности с физической подготовкой такие изменения и определяют генетическую предрасположенность некоторых людей не только к более высоким спортивным достижениям, но и к различным видам спорта [3, 12, 13].

Множество генов связаны с определенными спортивными качествами. Например, ген ACTN3 кодирует белок альфа-актинин-3, имеющий ключевое значение для мышечной силы [18] и быстрых взрывных движений [19-21]. Некоторые варианты этого гена связаны с высокими спортивными результатами индивидуумов, занимающихся силовыми видами спорта: бодибилдингом [22], спринтом [23] и тяжелой атлетикой [18]. Этот эффект у гомозигот по аллелю R577X объясняется тем, что ген ACTN3 в таких случаях не экспрессирует альфа-актинин-3 в саркомерах быстрых мышечных волокон, что приводит к уменьшению доли таких волокон и смещению мышечного метаболизма в сторону более выносливого, аэробного типа. Как следствие, профессиональные спортсмены с таким генотипом показывают худшие результаты в скоростных и силовых видах спорта [23, 24].

Ген *PPARA* (peroxisome proliferator activated receptor alpha) кодирует рецептор альфа, активируемый пролифератором пероксисом, который является одним из

главных регуляторов обмена липидов [25] и глюкозы, участвуя, таким образом, в энергетическом обмене клеток [26]. Белок PPAR-альфа экспрессируется в условиях дефицита энергии и обеспечивает активацию митохондриального пути бета-окисления жирных кислот, что приводит к повышению синтеза молекул аденозинтрифосфата (АТФ), что, в свою очередь, может способствовать повышению выносливости организма [27, 28]. Таким образом, он может оказывать влияние на аэробные способности человека (способности к физической активности низкой интенсивности, в которой кислород является основным источником энергии) и тренированность в циклических видах спорта, таких как гребля, марафон, биатлон, триатлон, беговые лыжи, плавание, конькобежный спорт и шоссейный велоспорт [29, 30]. Среди спортсменов с высокими способностями (участие в национальных и международных чемпионатах) в видах спорта на выносливость (гребля, марафон, биатлон, триатлон, беговые лыжи, плавание, конькобежный спорт и шоссейный велоспорт) обнаружена более высокая (95%) частота гомозиготного варианта rs4253778 (G833E) гена PPARA в сравнении с контрольной группой (5%) — малоподвижные лица или лица, которые не занимались соревновательными видами спорта [31].

Важное значение для физической подготовленности спортсменов имеют гены, контролирующие функцию сердечно-сосудистой системы, например ген *ACE*, кодирующий ангиотензинпревращающий фермент. Так, по данным метаанализа (2022), с выносливостью в спорте, особенно тех, кто занимается циклическими (аэробными) видами спорта, ассоциирован вариант гена *ACE* I/I [32].

В целом генетические исследования подтверждают гипотезу о наличии «оптимальных» генотипов для тех или иных видов спорта [13]. Однако следует иметь в виду, что генетическая предрасположенность не является единственным фактором, определяющим успех спортсмена.

Важно учитывать продолжительность и эффективность тренировок, равно как и психоэмоциональную устойчивость к стрессу, тревожности и неудачам в спорте [33].

ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ПРЕДРАСПОЛОЖЕННОСТЬ К ЗАНЯТИЯМ СПОРТОМ У ПОДРОСТКОВ

Подростки проходят через фазу активного роста и развития, когда генетическая предрасположенность начинает проявляться в фенотипе. Например, она может определять, как быстро подросток, занимающийся спортом, наберет мышечную массу, как эффективно будет выполнять упражнения и как будет протекать процесс восстановления после тренировок [1, 3]. В этом периоде важную роль играют гены, отвечающие за рост мышц. метаболизм и выносливость [34-36]. В числе таких генов упоминается ген ACTN3, генотип R577X которого связан с аэробной выносливостью подростков (13-15 лет), профессионально занимающихся футболом [9]. Приводятся свидетельства связи вариантов гена VDR (vitamin D receptor) рецептора витамина D с мышечной силой [37]. Сам витамин D положительно влияет на мышечную активность, производительность, модулирует транспорт фосфата и кальция через мембраны мышечных клеток, а также метаболизм фосфолипидов, индуцирует экспрессию нескольких миогенных факторов транскрипции и размеров миотубулярных волокон, которые совместно влияют на сократительные филаменты, что в итоге положительно сказывается на тренировках за счет увеличения размера и силы мышц. в том числе v молодых футболистов [38, 39]. Исследователи отмечают, что очень низкие концентрации 25(OH)D являются фактором, ограничивающим успешное участие в соревновательных видах спорта. Влияние 25(OH)D на энергетические возможности спортсмена определяет эргогенный эффект витамина D на выработку силы и долгосрочный положительный эффект на суперкомпенсацию (превышение исходного уровня работоспособности после нагрузки) и, следовательно, на положительные эффекты тренировок в течение длительного периода времени (то есть спортивной карьеры) [39]. Однако в плацебо-контролируемом исследовании 3-летнего курса еженедельного перорального приема витамина D_3 школьниками в возрасте 6-13 лет с дефицитом этого витамина не обнаружено увеличения силы хвата, взрывной мощности ног, пикового потребления кислорода или объемных показателей легких как в целом, так и в подгруппах, определенных по полу, что может говорить о вспомогательной роли данного гена в занятиях спортом в подростковом возрасте [40]. В небольшом исследовании (n = 55) была показана положительная связь вариантов гена VDR Fokl (rs2228570), Apal (rs7975232) и Bsml (rs1544410) с более высокой мышечной массой у элитных молодых (15-18 лет) футболистов. Также обнаружена положительная связь варианта Bsml гена VDR с более высокой массой икроножных мышц. Более того, анализ гаплотипа при неравновесном сцеплении однонуклеотидных вариантов Apal/Bsml гена VDR показал, что этот гаплотип отрицательно связан с площадью поперечного сечения икроножных мышц (calf muscle area) [10].

Предполагается, что генетическая диагностика у подростков, только начинающих свою карьеру в спорте, может стать полезным инструментом для прогнозирования их спортивных успехов и оптимизации тренировочных программ [16]. Вероятно, подростки с определенными генетическими вариантами могут иметь естественную предрасположенность к развитию мышечной массы или выносливости, что позволит им адаптироваться к более интенсивным нагрузкам. Разработка персонализирован-

ных подходов в спорте, основанных на индивидуальных генетических особенностях, возможно, способна повысить эффективность тренировок, что имеет особое значение в подростковом возрасте, когда организм находится в стадии активного роста. Однако необходимо учитывать, что физическая подготовка, тренировки, личная мотивация, физическое и психологическое состояние также играют важную роль в становлении спортивных навыков.

ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ПРЕДРАСПОЛОЖЕННОСТЬ К ЕДИНОБОРСТВАМ

Единоборства (бокс, борьба, дзюдо, тхэквондо) являются специфическими видами спорта, занятия которыми требуют высокой силы, скорости, координации и психической устойчивости. Генетические исследования показывают, что для достижения успеха в единоборствах особенно важны такие характеристики, как быстрые рефлексы, мышечная сила, выносливость и способность к восстановлению [1, 3, 6]. Так, например, обнаружено, что среди спортсменов, занимающихся боевыми видами спорта. выше частота вариантов rs7181866 и rs8031031 гена GABPB1 [41], который является одним из главных регуляторов функции митохондрий [42] и способствует лучшей адаптации митохондрий к прерывистым нагрузкам. Среди спортсменов-борцов (самбистов), показывающих высокие результаты в национальных и международных состязаниях, выше частота аллеля R577X гена ACTN3 [43, 44], а также генотипа D/D гена АСЕ [43], которые важны для силовых и взрывных движений. Данные, полученные в этих исследованиях, подтверждены и результатами метаанализов, согласно которым среди спортсменов, занимающихся силовыми видами спорта, частота встречаемости генотипа ACE I/I значительно ниже (отношение шансов (ОШ) 0,93 против 1,35; p < 0,01), а генотипа R/R гена ACTN3 — выше $(O \coprod 1,21$ против 0,94; p < 0,01), чем среди тех, кто занимается видами спорта на выносливость [32, 44].

Среди дзюдоистов международного класса японского происхождения обнаружена более высокая встречаемость носителей генотипов G/G и G/A гена инсулиноподобного фактора роста *IGF2* в сравнении со спортсменами уровнем ниже (национального уровня). Более того, обнаружена положительная связь генотипа *IGF2* A/A с уровнем результатов в дзюдо, что не обнаружено в отношении варианта *rs1815739* гена *ACTN3* [45, 46]. Известно, что ген *IGF2* ассоциирован с более высокой массой скелетных мышц, регенеративной способностью, высокими индексом массы тела, жировой массой и силой хвата [45].

Ген MSTN, кодирующий белок миостатин [47], в норме ограничивает рост мышечной ткани, однако некоторые варианты гена могут приводить к снижению образования миостатина и, как следствие, увеличению мышечной массы. Такой генетический фактор может быть важен для развития силовых качеств у спортсменов любого уровня подготовки. Метаанализ данных 71 исследования показал, что вариант K153R (rs1805086) гена MSTN и генотипы K/R и R/R сопряжены с силовыми качествами, способностями и мышечной массой спортсменов при занятиях силовыми видами спорта [47].

Для некоторых единоборств (борьба, смешанные единоборства — ММА) важна не только сила, но и выносливость. Гены, контролирующие работу сердечно-сосудистой системы и обмен веществ, влияют, таким образом, и на способность к длительным тренировкам и восстановлению между схватками. Например, метаанализ показал, что спортсмены с генотипом I/I гена ACE демонстрируют лучшие результаты в выносливости, что позволяет им успеш-

но адаптироваться к интенсивным тренировкам и длительным схваткам [32]. С высокой выносливостью связывают ген СКМ мышечной креатинкиназы, участвующей в ресинтезе молекул АТФ во время аэробной активности, и ген EPAS1 эндотелиального белка с доменом PAS1, запускающего клеточный ответ на гипоксию [48]. По данным метаанализа. вариант rs8111989 гена СКМ. аллель G и генотип G/G, ассоциированы (ОШ 1,14 и 1,54 соответственно) с занятием видами спорта с преобладанием анаэробных функций [49]. Другими словами, эти варианты гена СКМ могут влиять на способность мышц работать при интенсивных, взрывных движениях, что является отличительной чертой многих боевых видов спорта. С другой стороны, ген *EPAS1* регулирует другие гены, участвующие в эритропоэзе и ангиогенезе, что имеет решающее значение для доставки кислорода к мышцам и, таким образом, положительно влияет на выносливость спортсменов в боевых видах спорта, например в самбо, а также в спринте и тяжелой атлетике [50-52].

Для спортсменов, занимающихся в силовых дисциплинах, знание о наличии тех или иных генетических маркеров может быть полезным для оптимизации тренировочного процесса, включая акцент на восстановление и специфическую тренировку тех или иных групп мышц. А также позволяет просчитать предел спортсмена для выполнения какого-либо вида упражнений [53] и проводить специальные профилактические тренировки для предотвращения мышечных травм при наличии неблагоприятной генетической предрасположенности [11]. Однако интерпретация результатов генетических испытаний спортсмена требует осторожности. Любой генетический вариант объясняет лишь небольшую часть производительности, и многое зависит от количества тренировок, их организации, питания, суточного режима и прочих внешних факторов.

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ МАРКЕРЫ ПСИХОЛОГИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ В ЕДИНОБОРСТВАХ

В единоборствах важны не только физические способности, но и психологическая устойчивость спортсмена, способность совладать с критическими, экстремальными ситуациями, привлекая личностные ресурсы и ресурсы социальной поддержки [54]. Высокая психологическая устойчивость определяется восприятием боли (гены SCN9A (натриевый канал), SLC6A2 (транспортер норадреналина)), чертами личности или настроением (гены SLC6A2, DRD2 (дофаминовый рецептор), SLC6A4 (5-HTTLPR) (транспортер серотонина)), способностью к обучению (гены BDNF (нейротрофический фактор мозга) и MYRF (миелин-регулирующий фактор)), поскольку обучение в школе часто связано со стрессом в виде контрольных работ, трудностями в овладении отдельными предметами или сложностями во взаимоотношениях в классе [6, 55]. Одним из основных генетических факторов, влияющих на обучение, память и высшее мышление, по-видимому, является ген BDNF, отвечающий за выживание существующих нейронов, стимулирующий рост и дифференцировку новых нейронов и синапсов, контролирующий нейропластичность [7]. Этот ген также влияет на черты личности, повышая добросовестность и экстраверсию [56].

В исследовании, проведенном на группе из 305 спортсменов, занимающихся боевыми искусствами, и здоровых неспортсменов в качестве контроля, были выявлены статистически значимые различия в результатах личностных тестов и распределении частот некоторых генотипов гена BDNF (rs10767664). У спортсменов, занимающихся боевыми искусствами, по сравнению с контрольной груп-

пой наблюдались более высокие результаты по шкалам нейротизма (7,32 против 5,62; р < 0,001), экстраверсии (7,22 против 6,35; p = 0.042) и добросовестности (7,37 против 5,64; *p* < 0,001) в личностном пятифакторном опроснике NEO FFI (Neuroticism, Extraversion, Openness to Experience Five-Factor Inventory) [8]. Вероятно, эти различия могут указывать на то, что спортсмены, занимающиеся боевыми искусствами, обладают более выраженными чертами личности, способствующими успешности в их спортивной деятельности. Кроме того, была обнаружена более высокая частота генотипов T/T и A/T гена BDNF (rs10767664) среди спортсменов, занимающихся боевыми искусствами, в сравнении с неспортсменами. Эти результаты подчеркивают важность генетических факторов в формировании личностных черт, влияющих на психологическую устойчивость спортсменов.

Известно, что ген *COMT* (катехол-О-метилтрансфераза) ассоциирован с уровнем дофамина в головном мозге и, соответственно, с когнитивными процессами, тревожностью и реакцией на стресс [56]. В 2023 г. были опубликованы сведения о связи между вариантом *rs4680* гена *COMT* и психологическими характеристиками спортсменов-единоборцев — темпераментом, устойчивостью к стрессу, умственной выносливостью, уровнем самоконтроля [57]. Важно также отметить, что у спортсменов оценки такого качества, как «избегание вреда», были ниже, чем в контрольной группе [57].

Таким образом, результаты исследований подтверждают гипотезу о влиянии генетических факторов на личностные черты и адаптационные способности спортсменов. Вариации генов BDNF и COMT, регулирующих когнитивные и эмоциональные функции человека, особенно важны для спортсменов, занимающихся единоборствами. Это подчеркивает необходимость дальнейших исследований для комплексного изучения взаимодействия генетических и средовых факторов в контексте спортивной деятельности.

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ МАРКЕРЫ ВЫНОСЛИВОСТИ В ЦИКЛИЧЕСКИХ ВИДАХ СПОРТА

Циклические виды спорта (бег, плавание, велоспорт, лыжные гонки) в основном фокусируются на выносливости и аэробных способностях спортсменов. В отличие от единоборств, где важны сила и мощность, в циклических видах спорта на передний план выходит способность организма долгое время работать в режиме аэробной активности [58]. По этой причине для циклических видов спорта ключевыми являются гены, связанные с метаболизмом кислорода, выносливостью и восстановлением. Например, ген AMPD1 (ген аденозинмонофосфатдезаминазы 1 (АМФ-дезаминазы) — регулятора энергетического обмена в мышечном волокне, который смещает равновесие миокиновых реакций в сторону продукции АТФ путем преобразования АМФ в инозинмонофосфат) [59, 60] и ген PPARGC1A (коактиватор 1-альфа-рецептора, активируемого пролифератором пероксисом, гамма), кодирует PGC- 1α — коактиватор гамма-рецептора, который запускается пролифератором пероксисом 1 альфа, $\mathsf{PGC} ext{-}1lpha$ контролирует экспрессию генов, относящихся к окислению субстрата, митохондриальному биогенезу [61, 62] и преобразованию мышечных волокон, способствующих увеличению выносливости [62, 63]. Варианты H63D и C282Y гена HFE (гомеостатический белок-регулятор железа человека) ассоциируют с более высокими концентрациями железа и гемоглобина [64, 65]. Кроме того, вариант H63D повышает усвоение железа и оказывает положительное влияние на регуляцию эритропоэза у детей [66]. Показано также, что частоты генотипов rs1799945 CG/GG гена HFE выше у спортсменов на выносливость (бег на длинные дистанции). Этот ген играет важную роль в аэробной выносливости, так как железо является важным компонентом кислородсвязывающих белков и может иметь решающее значение для таких спортсменов [67].

В исследовании 123 профессиональных спортсменов (75 шоссейных велогонщиков и 48 бегунов) сравнивались частоты полиморфных вариаций генов, участвующих в выработке энергии и метаболизме железа у профессиональных спортсменов на выносливость по сравнению с контрольной группой неспортсменов (n = 122) [68]. Сравнение проводили по четырем вариантам трех генов: c.34C>T (rs17602729) гена AMPD1 (кодирует AMФдезаминазу), c.1444G>A (rs8192678) гена PPARGC1A, с.187C>G (rs1799945) и с.845G>A (rs1800562) гена *HFE*. Показано, что распределение генотипов, связанных с выработкой энергии и метаболизмом железа, различалось у спортсменов и контрольной группы. В частности, у спортсменов отмечена более высокая частота генотипа С/С гена АМРО1 (79.7% в сравнении с 66.4% в контрольной группе; p = 0.019), генотипа G/G гена *PPARGC1A* (у 62,6 и 53,3% соответственно; p = 0.011), а также генотипа G/C HFEH63D (у 55,3 и 27,9% соответственно; p < 0.001), но не генотипа G/G (у 92,7 и 92,6% соответственно; p = 0.986) гена *HFEC282Y* [68].

В другом исследовании пришли к схожему заключению показав, что аллель С гена *AMPD1* ассоциирует с достижением лучших результатов в тесте на кратковременную взрывную силу мышц (на основе теста на вертикальный прыжок) у спортсменов в спринтерских/силовых видах спорта, а более низкая частота аллеля Т (4,3%) у этих спортсменов по сравнению с аллелем С (86,3%) позволяет предположить, что аллель Т является фактором, неблагоприятным для занятий легкой атлетикой в спринтерских/силовых видах спорта [59].

Выявление генетических маркеров, ассоциированных с регуляцией роста кровеносных сосудов, важно для прогнозирования результативности в циклических видах спорта. Контроль процессов ангиогенеза (образования новых сосудов) связан с геном VEGFA (фактор роста эндотелия сосудов А), который регулирует пролиферацию, миграцию и дифференцировку клеток [69]. Ключевым фактором, влияющим на рост сосудов, является белок VEGF-A. Этот фактор роста активирует пролиферацию и миграцию эндотелиальных клеток сосудов и участвует в регуляции физиологического и патологического ангиогенеза [69-71]. У спортсменов высокая экспрессия аллеля С (rs2010963) гена VEGFA ассоциирована с более выраженным адаптационным ростом капилляров в ответ на физические нагрузки аэробного характера, что способствует более высокой выносливости благодаря приросту максимального потребления кислорода [72-74].

Влияет на выносливость спортсменов в циклических видах спорта уже упомянутый выше ген *ACE*, участвующий в регуляции кровяного давления и водно-электролитного баланса [1, 21, 32]. Генотип I/I снижает вероятность повышенного артериального давления, однако носительство аллеля D и генотипы I/D и D/D повышают частоту наличия артериальной гипертензии. Также генотип I/I этого гена ассоциирован с более высокой аэробной выносливостью и эффективным восстановлением после длительных нагрузок [32].

Таким образом, можно сказать, что выносливость — это не только результат тренировки, но и продукт сложных биологических процессов, связанных с энергетическим обменом и биогенезом митохондрий.

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ МАРКЕРЫ ПСИХОЛОГИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ В ЦИКЛИЧЕСКИХ ВИДАХ СПОРТА

Циклические виды спорта, в отличие от единоборств, предполагают определенный, достаточно жестко зафиксированный план поведения спортсмена, не предполагающий учета постоянно резко меняющихся внешних факторов [75]. Единоборства, в свою очередь, характеризуются такими особенностями, как непосредственное столкновение лицом к лицу с противником, постоянное чувство опасности, широкий диапазон действий, агрессивность противника, его активное противоборство, а также дефицит времени на принятие молниеносных решений и их незамедлительное выполнение [76].

Упомянутый выше ген *COMT*, влияющий на мотивацию, эмоции, устойчивость к стрессу, самоконтроль, регуляцию сна, обработку и восприятие боли, аддиктивное поведение и нейродегенерацию, которые могут лежать в основе различий в достижении выдающихся результатов в спортивных соревнованиях, может быть в том числе и фактором психологической устойчивости. В исследованиях на пловцах было установлено, что результаты у спортсменов — носителей варианта V158M гена *COMT* (*rs4680*) лучше, чем у пловцов с генотипом Val/Val: первые показали более высокие средние баллы FINA (Fédération Internationale de Natation — Международная федерация плавания) и чаще становились элитными спортсменами, чем носители аллеля Val [77].

Циклические виды спорта, такие как плавание, требуют долгосрочной концентрации, выносливости и способности к быстрому восстановлению после интенсивных нагрузок. Ген COMT (rs4680) благодаря своему влиянию на когнитивные способности и эмоциональную регуляцию может играть ключевую роль в этих аспектах. Исследования, показывающие, что у пловцов с вариантом V158M в гене COMT (rs4680) результаты лучше, подтверждают гипотезу о том, что генетический профиль может влиять на способность спортсмена справляться с высокими требованиями этих видов спорта.

ГЕНЕТИЧЕСКИЙ ПРОФИЛЬ: ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ В ПОДГОТОВКЕ СПОРТСМЕНОВ

Обсуждается целесообразность определения генетического профиля спортсмена для повышения эффективности его подготовки, оптимизации тренировочного процесса и психологического сопровождения. Одним из ключевых аспектов применения генетического профиля является индивидуализация тренировочных программ. Анализ генетических маркеров, связанных с типами мышечных волокон, выносливостью, мышечной силой, скоростью позволяет выявить предрасположенность спортсмена к доминированию быстрых или медленных мышечных волокон. Это, в свою очередь, позволяет более точно подбирать упражнения для развития конкретных физиологических качеств. Например, варианты генов, кодирующих миозин и миостатин, ассоциируются с преобладанием быстрых или медленных мышечных волокон. На основании этого знания могут быть разработаны программы, направленные на развитие силы, выносливости или скоростных качеств. Генетические вариации, связанные с метаболизмом, воспалительными процессами и регенерацией тканей, могут существенно влиять на устойчивость к тренировочным нагрузкам и скорость восстановления. Это позволяет корректировать интенсивность тренировок, интервалы отдыха и использовать специализированные методы восстановления. Генетическое тестирование может быть использовано также и для прогнозирования спортивных достижений [13, 58, 78].

Генетические факторы могут существенно влиять на когнитивные способности, темперамент и эмоциональную устойчивость спортсмена. Это важно для достижения высоких результатов в спорте, так как психологические аспекты играют ключевую роль в подготовке и выступлении. Например, полиморфизмы в генах, кодирующих дофаминовые рецепторы, могут быть связаны с уровнем мотивации, склонностью к риску и способностью к принятию решений в стрессовых ситуациях. Это знание позволяет психологам разрабатывать более эффективные программы психологической подготовки, мотивации и поддержки, противодействия стрессу и эмоциональному выгоранию [33, 75]. Например, для спортсменов с высоким уровнем «генетической тревожности» могут быть разработаны методы когнитивно-поведенческой терапии и техники релаксации. Генетические маркеры, связанные с чувствительностью к стрессу, могут быть использованы и для прогнозирования риска развития психических расстройств, таких как депрессия или тревожные расстройства. Это позволяет разрабатывать профилактические меры и своевременно вмешиваться в процесс подготовки [77].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Генетическая предрасположенность играет важную роль в развитии и становлении как спортсмена личности, в том числе и подростков, в различных видах спорта. Генетические факторы, связанные с силой, выносливостью, восстановлением и психологической устойчивостью, ассоциированы с успехом в единоборствах и циклических видах спорта. Определение генетического профиля спортсмена открывает новые перспективы для персонализированного подхода к тренировочному процессу и психологической подготовке. Исследования в этой области продолжаются, а новые данные позволяют более точно оценить потенциал спортсменов, их физические и психоэмоциональные возможности. Однако использо-

вание генетической информации требует тщательного учета этических, правовых и методических аспектов. Важно обеспечить соблюдение принципов конфиденциальности, получения информированного согласия, а также проводить дальнейшие исследования для повышения точности генетических прогнозов и их применимости в реальных условиях. Таким образом, интеграция генетической информации в тренировочный процесс и психологическую подготовку может стать важным шагом на пути к повышению эффективности спортивной подготовки и достижению высоких результатов.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Отсутствует.

FINANCING SOURCE

Not specified.

РАСКРЫТИЕ ИНТЕРЕСОВ

Автор статьи подтвердил отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить.

DISCLOSURE OF INTEREST

Not declared.

ВКЛАД АВТОРОВ

И.М. Жугель — определение концепции, проведение исследования, написание черновика рукописи, пересмотр и редактирование рукописи.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Ilya M. Zhugel — study concept, conducting the study, manuscript draft writing, manuscript review and editing.

ORCID

И.М. Жугель

https://orcid.org/0000-0001-5854-9301

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- 1. Ahmetov II, John G, Semenova EA, Hall ECR. Genomic predictors of physical activity and athletic performance. *Adv Genet*. 2024;111:311–408. doi: https://doi.org/10.1016/bs.adgen.2024.01.001
- 2. Ahmetov II, Hall ECR, Semenova EA, et al. Advances in sports genomics. *Adv Clin Chem.* 2022;107:215–263. doi: https://doi.org/10.1016/bs.acc.2021.07.004
- 3. Semenova EA, Hall ECR, Ahmetov II. Genes and Athletic Performance: The 2023 Update. *Genes (Basel)*. 2023;14(6):1235. doi: https://doi.org/10.3390/genes14061235
- 4. Bıçakçı B, Cięszczyk P, Humińska-Lisowska K. Genetic Determinants of Endurance: A Narrative Review on Elite Athlete Status and Performance. *Int J Mol Sci.* 2024;25(23):13041. doi: https://doi.org/10.3390/ijms252313041
- 5. Kumagai H, Miller B, Kim SJ, et al. Novel Insights into Mitochondrial DNA: Mitochondrial Microproteins and mtDNA Variants Modulate Athletic Performance and Age-Related Diseases. *Genes*. 2023;14(2):286. doi: https://doi.org/10.3390/genes14020286
- 6. Anastasiou K, Morris M, Akam L, Mastana S. The Genetic Profile of Combat Sport Athletes: A Systematic Review of Physiological, Psychological and Injury Risk Determinants. *Int J Environ Res Public Health*. 2024;21(8):1019. doi: https://doi.org/10.3390/jjerph21081019
- 7. Kowiański P, Lietzau G, Czuba E, et al. BDNF: A Key Factor with Multipotent Impact on Brain Signaling and Synaptic Plasticity. *Cell Mol Neurobiol.* 2018;38(3):579–593. doi: https://doi.org/10.1007/s10571-017-0510-4
- 8. Niewczas M, Król P, Czarny W, et al. Association Analysis of Polymorphic Variants of the BDNF Gene in Athletes. *Genes (Basel)*. 2021;12(9):1340. doi: https://doi.org/10.3390/genes12091340

- 9. Yang S, Lin W, Jia M, Chen H. Association between ACE and ACTN3 genes polymorphisms and athletic performance in elite and subelite Chinese youth male football players. *Peer J.* 2023;11:e14893. doi: https://doi.org/10.7717/peerj.14893
- 10. Flore L, Robledo R, Dettori L, et al. Association of VDR Polymorphisms with Muscle Mass Development in Elite Young Soccer Players: A Pilot Study. Sports (Basel). 2024;12(9):253. doi: https://doi.org/10.3390/sports12090253
- 11. Appel M, Zentgraf K, Krüger K, Alack K. Effects of Genetic Variation on Endurance Performance, Muscle Strength, and Injury Susceptibility in Sports: A Systematic Review. *Front Physiol.* 2021;12:694411. doi: https://doi.org/10.3389/fphys.2021.694411
- 12. Pitsiladis YP, Tanaka M, Eynon N, et al. Athlome Project Consortium: a concerted effort to discover genomic and other "omic" markers of athletic performance. *Physiol Genomics*. 2016;48(3):183–190. doi: https://doi.org/10.1152/physiolgenomics.00105.2015
- 13. Шайдуллаева 3.Ш. Роль спортивной генетики в современном спорте//Scientific progress. 2021. Т.1. \mathbb{N}^2 2. С.1734—1742. [Shaydullaeva ZS. The role of sports genetics in modern sports. Scientific progress. 2021;2(1):1734—1742. (In Russ).]
- 14. Медицинская генетика: национальное руководство / под ред. Е.К. Гинтера, В.П. Пузырева, С.И. Куцева. М.: ГЭОТАР-Медиа; 2022. 896 с. [$Meditsinskaya\ genetika$: a national guide. Ginter EK, Puzyrev VP, Kutsev SI, eds. Moscow: GEOTAR-Media; 2022. 896 p. (In Russ).]
- 15. Баранов В.С. Геномика и предиктивная медицина // Сибирский журнал клинической и экспериментальной медицины. 2021. Т. 36. № 4. С. 14–28. doi: https://doi.org/10.29001/2073-8552-2021-36-4-14-28 [Baranov VS. Genomics and predictive medicine. Siberian Journal of Clinical

- and Experimental Medicine. 2021;36(4):14–28. (In Russ). doi: https://doi.org/10.29001/2073-8552-2021-36-4-14-28]
- 16. Максименко Л.В. Эпигенетика как доказательная база влияния образа жизни на здоровье и болезни // Профилактическая медицина. 2019. Т. 22. \mathbb{N}° 2. С. 115–120. —
- doi: https://doi.org/10.17116/profmed201922021115 [Maksimenko LV. Epigenetics as an evidence base of the impact of lifestyle on health and diseases. *Russian Journal of Preventive Medicine*. 2019;22(2):115–120. (In Russ). doi: https://doi.org/10.17116/profmed201922021115]
- 17. Wu YL, Lin ZJ, Li CC, et al. Epigenetic regulation in metabolic diseases: mechanisms and advances in clinical study. *Signal Transduct Target Ther.* 2023;8(1):98. doi: https://doi.org/10.1038/s41392-023-01333-7
- 18. El Ouali EM, Barthelemy B, Del Coso J, et al. A Systematic Review and Meta-analysis of the Association Between ACTN3 R577X Genotypes and Performance in Endurance Versus Power Athletes and Non-athletes. *Sports Med Open.* 2024;10(1):37. doi: https://doi.org/10.1186/s40798-024-00711-x
- 19. Pickering C, Kiely J. ACTN3: More than Just a Gene for Speed. Front Physiol. 2017;8:1080. doi: https://doi.org/10.3389/fphys.2017.01080
- 20. Del Coso J, Hiam D, Houweling P, et al. More than a 'speed gene': ACTN3 R577X genotype, trainability, muscle damage, and the risk for injuries. *Eur J Appl Physiol*. 2019;119(1):49–60. doi: https://doi.org/10.1007/s00421-018-4010-0
- 21. Melián Ortiz A, Laguarta-Val S, Varillas-Delgado D. Muscle Work and Its Relationship with ACE and ACTN3 Polymorphisms Are Associated with the Improvement of Explosive Strength. Genes (Basel). 2021;12(8):1177. doi: https://doi.org/10.3390/genes12081177
- 22. Pereira MA, Rosse IC, Silva AC, et al. Influence of Alpha-Actinin-3 R577X Polymorphism on Muscle Damage and the Inflammatory Response after an Acute Strength Training Session. *Biomed Res Int.* 2022;2022:5447100. doi: https://doi.org/10.1155/2022/5447100
- 23. Balberova OV, Shnayder NA, Bykov EV, et al. Association of the *ACTN3* Gene's Single-Nucleotide Variant Rs1815739 (R577X) with Sports Qualification and Competitive Distance in Caucasian Athletes of the Southern Urals. *Genes (Basel)*. 2023;14(8):1512. doi: https://doi.org/10.3390/genes14081512
- 24. Боронникова С.В., Васильева Ю.С., Бурлуцкая М.Ю. и др. Генетический полиморфизм спортсменов с разным спортивным стажем // Экология человека. 2019. № 8. С. 50–57. doi: https://doi.org/10.33396/1728-0862-8-50-58 [Boronnikova SV, Vasilyeva YuS, Burlutskaya MY, et al. Genetic polymorphism of athletes with different sports experience. Ekologiya cheloveka = Human Ecology. 2019;(8):50–57. (In Russ). doi: https://doi.org/10.33396/1728-0862-8-50-58]
- 25. Del Coso J, Moreno V, Gutiérrez-Hellín J, et al. ACTN3 R577X Genotype and Exercise Phenotypes in Recreational Marathon Runners. *Genes (Basel)*. 2019;10(6):413. doi: https://doi.org/10.3390/genes10060413
- 26. Guo YX, Wang BY, Gao H, et al. Peroxisome Proliferator-Activated Receptor-α: A Pivotal Regulator of the Gastrointestinal Tract. *Front Mol Biosci.* 2022;9:864039. doi: https://doi.org/10.3389/fmolb.2022.864039
- 27. Małodobra-Mazur M, Ołdakowska M, Dobosz T. Exploring PPAR Gamma and PPAR Alpha's Regulation Role in Metabolism via Epigenetics Mechanism. *Biomolecules*. 2024;14(11):1445. doi: https://doi.org/10.3390/biom14111445
- 28. Montaigne D, Butruille L, Staels B. PPAR control of metabolism and cardiovascular functions. *Nat Rev Cardiol*. 2021;18(12): 809–823. doi: https://doi.org/10.1038/s41569-021-00569-6
- 29. Végh D, Reichwalderová K, Slaninová M, Vavák M. The Effect of Selected Polymorphisms of the ACTN3, ACE, HIF1A and PPARA Genes on the Immediate Supercompensation Training Effect of Elite Slovak Endurance Runners and Football Players. Genes (Basel). 2022;13(9):1525. doi: https://doi.org/10.3390/genes13091525
- 30. Kazancı D, Polat T, Kaynar Ö, et al. PPARA and IL6: exploring associations with athletic performance and genotype polymorphism. *Cell Mol Biol (Noisy-le-grand)*. 2023;69(11):69–75. doi: https://doi.org/10.14715/cmb/2023.69.11.12
- 31. Lopez-Leon S, Tuvblad C, Forero DA. Sports genetics: the PPARA gene and athletes' high ability in endurance sports. A systematic review and meta-analysis. *Biol Sport*. 2016;33(1):3–6. doi: https://doi.org/10.5604/20831862.1180170

- 32. Ipekoglu G, Bulbul A, Cakir HI. A meta-analysis on the association of ACE and PPARA gene variants and endurance athletic status. *J Sports Med Phys Fitness*. 2022;62(6):795–802. doi: https://doi.org/10.23736/S0022-4707.21.12417-X
- 33. Немков Н.С. Психоэмоциональная устойчивость спортсменов // Наука и образование в современном вузе: вектор развития: сборник материалов научно-практической конференции. Шуя; 2022. С. 207–208. [Nemkov NS. Psikhoemotsional'naya ustoichivost' sportsmenov. In: Nauka i obrazovanie v sovremennom vuze: vektor razvitiya: Abstract book from a scientific and practical conference. Shuya; 2022. pp. 207–208. (In Russ).]
- 34. Bulgay C, Cepicka L, Dalip M, et al. The relationships between ACTN3 rs1815739 and PPARA-α rs4253778 gene polymorphisms and athletic performance characteristics in professional soccer players. *BMC Sports Sci Med Rehabil*. 2023;15(1):121. doi: https://doi.org/10.1186/s13102-023-00733-0
- 35. Baig MH, Ahmad K, Moon JS, et al. Myostatin and its Regulation: A Comprehensive Review of Myostatin Inhibiting Strategies. *Front Physiol.* 2022;13:876078. doi: https://doi.org/10.3389/fphys.2022.876078
- 36. Ghouroghchi AP, SeyedKhandani N, Dehghani M, Siahkohian M. Correlation between angiotensin converting enzyme gene polymorphism and endurance performance of novice adolescent wrestlers. *Sport Sciences and Health Research*. 2021;14(1):23–35. doi: https://doi.org/10.22059/sshr.2023.344400.1060
- 37. Krasniqi E, Boshnjaku A, Wagner KH, Wessner B. Association between Polymorphisms in Vitamin D Pathway-Related Genes, Vitamin D Status, Muscle Mass and Function: A Systematic Review. *Nutrients*. 2021;13(9):3109. doi: https://doi.org/10.3390/nu13093109
- 38. Silva ABJD, Carmo TSD, Souza APS, et al. The role of serum levels of vitamin D in children's muscle strength: A systematic review. *Clinics* (*Sao Paulo*). 2021;76:e3200. doi: https://doi.org/10.6061/clinics/2021/e3200
- 39. Gilic B, Kosor J, Jimenez-Pavon D, et al. Associations of Vitamin D Levels with Physical Fitness and Motor Performance; A Cross-Sectional Study in Youth Soccer Players from Southern Croatia. *Biology (Basel)*. 2021;10(8):751. doi: https://doi.org/10.3390/biology10080751
- 40. Ganmaa D, Hemmings S, Jolliffe DA, et al. Influence of vitamin D supplementation on muscle strength and exercise capacity in Mongolian schoolchildren: secondary outcomes from a randomised controlled trial. *BMJ Open Sport Exerc Med.* 2024;10(3):e002018. doi: https://doi.org/10.1136/bmjsem-2024-002018
- 41. Guilherme JPLF, Souza-Junior TP, Lancha Junior AH. Association study of performance-related polymorphisms in Brazilian combat-sport athletes highlights variants in the GABPB1 gene. *Physiol Genomics*. 2021;53(2):47–50. doi: https://doi.org/10.1152/physiolgenomics.00118.2020
- 42. Liu C, Dai SK, Sun Z, et al. GA-binding protein GABPβ1 is required for the proliferation of neural stem/progenitor cells. Stem Cell Res. 2019;39:101501. doi: https://doi.org/10.1016/j.scr.2019.101501
- 43. Гузеева Е.А., Година Е.З., Бондарева Э.А., Махалин А.В. Полиморфизм гена АСЕ у борцов-самбистов Республики Алтай // Экстремальная деятельность человека. 2017. № 1. С. 14–17. [Guzeeva EA, Godina EZ, Bondareva EA, Makhalin AV. Polymorphism of ace gene sambo wrestlers of Altai Republic. Ekstremal'naya deyatel'nost' cheloveka. 2017;(1):14–17. (In Russ).] 44. Kikuchi N, Ueda D, Min SK, et al. The ACTN3 XX genotype's underrepresentation in Japanese elite wrestlers. Int J Sports Physiol Perform. 2013;8(1):57–61. doi: https://doi.org/10.1123/ijspp.8.1.57
- 45. Itaka T, Agemizu K, Aruga S, Machida S. G Allele of the IGF2 Apal Polymorphism Is Associated With Judo Status. *J Strength Cond Res.* 2016;30(7):2043–2048. doi: https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001300
- 46. Tharabenjasin P, Pabalan N, Jarjanazi H. Association of the ACTN3 R577X (rs1815739) polymorphism with elite power sports: A meta-analysis. *PLoS One*. 2019;14(5):e0217390. doi: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217390
- 47. Аксенов М.О. Метаанализ ассоциации полиморфизма гена MSTN гs1805086 с силовыми показателями спортсменов // Сибирский журнал наук о жизни и сельского хозяйства. 2021. Т. 13. № 2. С. 303–335. doi: https://doi.org/ 10.12731/2658-6649-2021-13-2-303-335 [Aksenov MO. Metaanalysis of MSTN RS1805086 gene polymorphism association with strength indicators of athletes. Siberian Journal of Life Sciences

- and Agriculture. 2021;13(2):303–335. (In Russ). doi: https://doi.org/10.12731/2658-6649-2021-13-2-303-335]
- 48. Yamamichi H, Kasakura S, Yamamori S, et al. Creatine kinase gene mutation in a patient with muscle creatine kinase deficiency. *Clin Chem.* 2001;47(11):1967–1973.
- 49. Chen C, Sun Y, Liang H, et al. A meta-analysis of the association of CKM gene rs8111989 polymorphism with sport performance. *Biol Sport.* 2017;34(4):323–330. doi: https://doi.org/10.5114/biolsport.2017.69819
- 50. Бондарева Е.А., Година Е.З. Связь полиморфизма гена EPAS1 G/A с успешными выступлениями в группе российских борцов // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2016. Т. 20. \mathbb{N}^2 1. С. 23–27. doi: https://doi.org/10.18699/VJ16.121 [Bondareva EA, Godina EZ. The relationship of EPAS1 G/A gene polymorphism with successful performances in a group of Russian wrestlers. Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2016;20(1):2327. (In Russ). doi: https://doi.org/10.18699/VJ16.121]
- 51. Peng Y, Cui C, He Y, et al. Down-Regulation of EPAS1 Transcription and Genetic Adaptation of Tibetans to High-Altitude Hypoxia. *Mol Biol Evol.* 2017;34(4):818–830. doi: https://doi.org/10.1093/molbev/msw280
- 52. Voisin S, Cieszczyk P, Pushkarev VP, et al. EPAS1 gene variants are associated with sprint/power athletic performance in two cohorts of European athletes. *BMC Genomics*. 2014;15(1):382. doi: https://doi.org/10.1186/1471-2164-15-382
- 53. Пономарева О.В. Генетика в современном спорте: научные технологии для новых достижений // Наука молодых (Eruditio Juvenium). 2018. Т. 6. № 4. С. 569–581. doi: https://doi.org/10.23888/HMJ201864569-581 [Ponomareva OV. Genetics in modern sports: scientific technologies for new achievements. Science of the young = Eruditio Juvenium. 2018;6(4):569–581. (In Russ). doi: https://doi.org/10.23888/HMJ201864569-581]
- 54. Maul S, Giegling I, Fabbri C, et al. Genetics of resilience: Implications from genome-wide association studies and candidate genes of the stress response system in posttraumatic stress disorder and depression. *Am J Med Genet B Neuropsychiatr Genet.* 2020;183(2):77−94. doi: https://doi.org/10.1002/ajmg.b.32763 55. Жожикашвили Н.А., Малых А.С., Девятерикова А.А. Пси-хическая устойчивость // Теоретическая и экспериментальная психология. 2021. № 4. С. 49–65. [Zhozhikashvili NA, Malykh AS, Devyaterikova AA. Mental stability. *Theoretical and Experimental Psychology.* 2021;(4):49–65. (In Russ).]
- 56. Humińska-Lisowska K, Chmielowiec J, Chmielowiec K, et al. Associations of Brain-Derived Neurotropic Factor rs6265 Gene Polymorphism with Personality Dimensions among Athletes. *Int J Environ Res Public Health*. 2022;19(15):9732. doi: https://doi.org/10.3390/ijerph19159732
- 57. Humińska-Lisowska K, Chmielowiec K, Chmielowiec J, et al. Association Between the rs4680 Polymorphism of the COMT Gene and Personality Traits among Combat Sports Athletes. *J Hum Kinet*. 2023;89:89–99. doi: https://doi.org/10.5114/jhk/168789
- 58. Кузнецова В.С. Анализ методик комбинированных тренировок в циклических видах спорта // Молодой ученый. 2022. № 46. С. 149–151. [Kuznetsova VS. Analiz metodik kombinirovannykh trenirovok v tsiklicheskikh vidakh sporta. Young Scientist. 2022;(46):149–151. (In Russ).]
- 59. Ginevičienė V, Jakaitienė A, Pranculis A, et al. AMPD1 rs17602729 is associated with physical performance of sprint and power in elite Lithuanian athletes. *BMC Genet*. 2014;15:58. doi: https://doi.org/10.1186/1471-2156-15-58
- 60. Maciejewska-Skrendo A, Cięszczyk P, Chycki J, et al. Genetic Markers Associated with Power Athlete Status. *J Hum Kinet*. 2019;68:17–36. doi: https://doi.org/10.2478/hukin-2019-0053 61. Peplonska B, Adamczyk JG, Siewierski M, et al. Genetic variants associated with physical and mental characteristics of the elite athletes in the Polish population. *Scand J Med Sci Sports*. 2017;27(8):788–800. doi: https://doi.org/10.1111/sms.12687
- 62. Chen Y, Wang D, Yan P, et al. Meta-analyses of the association between the PPARGC1A Gly482Ser polymorphism and athletic performance. *Biol Sport.* 2019;36(4):301–309. doi: https://doi.org/10.5114/biolsport.2019.88752
- 63. Tharabenjasin P, Pabalan N, Jarjanazi H. Association of PPARGC1A Gly428Ser (rs8192678) polymorphism with potential for athletic ability and sports performance: A meta-analysis. *PLoS One*. 2019;14(1):e0200967. doi: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200967
- 64. Jones NR, Ashmore JH, Lee SY, et al. Association Studies of HFE C282Y and H63D Variants with Oral Cancer Risk and Iron Homeostasis

- Among Whites and Blacks. *Cancers (Basel)*. 2015;7(4):2386–2396. doi: https://doi.org/10.3390/cancers7040898
- 65. Волошина Н.Б., Осипенко М.Ф., Литвинова Н.В. и др. Гемохроматоз современное состояние проблемы // Терапевтический архив. 2018. Т. 90. № 3. С. 107 112. doi: https://doi.org/10.26442/terarkh2018903107-112 [Voloshina NB, Osipenko MF, Litvinova NV, et al. Hemochromatosis the current state of the problem. *Therapeutic archive*. 2018;90(3):107 112. (In Russ). doi: https://doi.org/10.26442/terarkh2018903107-112]
- 66. Barbara KH, Marcin L, Jedrzej A, et al. The impact of H63D HFE gene carriage on hemoglobin and iron status in children. *Ann Hematol.* 2016;95(12):2043–2048. doi: https://doi.org/10.1007/s00277-016-2792-x
- 67. Semenova EA, Miyamoto-Mikami E, Akimov EB, et al. The association of HFE gene H63D polymorphism with endurance athlete status and aerobic capacity: novel findings and a meta-analysis. *Eur J Appl Physiol*. 2020;120(3):665–673. doi: https://doi.org/10.1007/s00421-020-04306-8
- 68. Varillas Delgado D, Tellería Orriols JJ, Monge Martín D, Del Coso J. Genotype scores in energy and iron-metabolising genes are higher in elite endurance athletes than in nonathlete controls. *Appl Physiol Nutr Metab*. 2020;45(11):1225–1231. doi: https://doi.org/10.1139/apnm-2020-0174
- 69. di Somma M, Vliora M, Grillo E, et al. Role of VEGFs in metabolic disorders. *Angiogenesis*. 2020;23(2):119–130. doi: https://doi.org/10.1007/s10456-019-09700-1
- 70. Elias I, Franckhauser S, Bosch F. New insights into adipose tissue VEGF-A actions in the control of obesity and insulin resistance. *Adipocyte*. 2013;2(2):109–112. doi: https://doi.org/10.4161/adip.22880
- 71. Abhinand CS, Raju R, Soumya SJ, et al. VEGF-A/VEGFR2 signaling network in endothelial cells relevant to angiogenesis. *J Cell Commun Signal*. 2016;10(4):347–354. doi: https://doi.org/10.1007/s12079-016-0352-8
- 72. Ахметов И.И., Хакимуллина А.М., Попов Д.В. и др. Полиморфизм гена фактора роста эндотелия сосудов (VEGF) и аэробная работоспособность спортсменов // Физиология человека. 2008. Т. 4. № 34. С. 477—481. [Akhmetov II, Khakimullina AM, Popov DV, et al. Polymorphism of the vascular endothelial growth factor gene (VEGF) and aerobic performance in athletes. Fiziologiya Cheloveka. 2008;4(34):477—481. (In Russ).]
- 73. Мамиев Н.Д., Василенко В.С., Семенова Ю.Б. и др. Метаболические биомаркеры нарушения адаптации к физическим нагрузкам и самооценка качества жизни у спортсменов // Медицина: теория и практика. 2024. Т. 9. № 1. С. 34–41. doi: https://doi.org/10.56871/ MTP.2024.71.68.004 [Mamiev ND, Vasilenko VS, Semenova YuB, et al. Metabolic biomarkers of impaired adaptation to physical activity and self-assessment of quality of life in athletes. *Medicine: theory and practice*. 2024;9(1):34–41. (In Russ). doi: https://doi.org/10.56871/MTP.2024.71.68.004]
- 74. Мамиев Н.Д., Василенко В.С., Семенова Ю.Б. и др. Цитокины как маркеры нефункционального перенапряжения у спортсменов-гребцов // Педиатр. 2024. Т. 15. № 1. С. 55–64. doi: https://doi.org/10.17816/PED15155-63 [Mamiev ND, Vasilenko VS, Semenova YuB, et al. Cytokines as markers of non-functional overexertion in rowing athletes. Pediatrician. 2024;15(1):55–64. (In Russ). doi: https://doi.org/10.17816/PED15155-63
- 75. Колошеина В.В. Психологическая устойчивость в спорте // Молодой ученый. 2019. № 49. С. 549–551. [Kolosheina VV. Psikhologicheskaya ustoichivost' v sporte. Young scientist. 2019;(49):549–551. (In Russ).]
- 76. Garrido-Muñoz M, Blanco-García C, Diez-Vega I, et al. Psychological resilience, athletic experience, and competitive level of judokas. A transversal study. *Front Psychol.* 2024;15:1440412. doi: https://doi.org/10.3389/fpsyg.2024.1440412
- 77. Abe D, Doi H, Asai T, et al. Association between COMT Val158Met polymorphism and competition results of competitive swimmers. *J Sports Sci.* 2018;36(4):393–397. doi: https://doi.org/10.1080/02640414.2017.1309058
- 78. Кочергина А.А. Современные методы спортивной генетики, определяющие направленность тренировочного процесса // Молодой ученый. 2021. № 43. С. 306–308. [Kochergina AA. Sovremennye metody sportivnoi genetiki, opredelyayushchie napravlennost' trenirovochnogo protsessa. Young scientist. 2021;(43):306–308. (In Russ).]