

УДК 612.015.3:575.113:615.015:796.015

ОЦЕНКА ПРОГНОСТИЧЕСКОЙ ЦЕННОСТИ, АДАПТАЦИИ К НАГРУЗКАМ И СВЯЗЬ ГЕНОВ МАРКЕРОВ ВИТАМИНА D У СПОРТСМЕНОВ ЦИКЛИЧЕСКИХ ВИДОВ СПОРТА УЗБЕКИСТАНА

Авезова Малохат Закировна - Самостоятельный соискатель Центра спортивной медицины, врач - лаборант цитоморфолог Центра детской онкологии, гематологии и иммунологии РУз.

Рахимова Ноиба Мирзаатхамовна - DSc Заведующая руководителем отделением лаборатории Центра спортивной медицины.

Аннотация. Изучить особенности распределения аллелей и генотипов полиморфизмов rs1544410 (BsmI) и rs2228570 (FokI) гена рецептора витамина D (VDR), а также оценить их взаимосвязь с физической работоспособностью у спортсменов циклических видов спорта Республики Узбекистан.

Установлено, что уровень инсоляции и характер тренировочных нагрузок способны модифицировать фенотипическое проявление экспрессию генов системы VDR. В работе представлена оценка потенциала данных полиморфизмов в качестве самостоятельных молекулярно-генетических маркеров для спортивного отбора и прогнозирования адаптационных резервов.

Полученные нами результаты вносят важный вклад в понимание популяционной генетики спорта в Узбекистане.

Ключевые слова: гены VDR, витамин D, 25(OH)D, рецептор витамина D, VDR, спортивная медицина.

Annotatsiya. Maqsad Ushbu tadqiqot VDR genining rs1544410 va rs2228570 polimorfizmlarining allellari va genotiplarining taqsimlanishini o'rganishga, ularning tsiklik sport turlari bilan shug'ullanuvchi O'zbekiston Respublikasi sportchilarida sport holati va o'ziga xos sport ixtisoslashuvi bilan bog'liqligini baholashga qaratilgan edi. Insolyatsiya va mashg'ulot yuklamalarining tabiati (ochiq havoda va yopiq joylarda) VDR genlarining ifodasini o'zgartirishi mumkin.

Polimorfizmlardan mustaqil diagnostika markerlari sifatida foydalanish imkoniyatlarini baholash uchun ushbu tadqiqot o'tkazildi. Bizning natijalarimiz sportning populyatsion genetikasini tushunishga muhim hissa qo'shadi.

Shuningdek, insolyatsiya va mashg'ulot yuklamalari kabi atrof-muhit omillari va bioimpedans tahlili qo'llanildi.

Kalit so'zlar: VDR genlari, D vitamini, 25(OH)D, D vitamini retseptorlari, VDR, sport tibbiyoti.

Abstract. Objective was to investigate the distribution of alleles and genotypes of the rs1544410 and rs2228570 polymorphisms of the VDR gene to assess their relationship with athletic status and specific sports specialization in athletes engaged in cyclic sports in the Republic of Uzbekistan.

Insolation and the nature of training loads (outdoors vs. indoors) can modify the expression of VDR genes. This study was conducted to evaluate the potential of using these polymorphisms as independent diagnostic markers.

Our results make an important contribution to understanding the population genetics of sport.

Keywords: VDR genes, vitamin D, 25(OH)D, vitamin D receptor, VDR, stress, sports medicine.

Введение. В последние годы одним из наиболее перспективных направлений спортивной медицины является изучение генетических факторов, определяющих индивидуальные особенности физической работоспособности, адаптации к тренировочным нагрузкам и спортивной успешности. Дефицит 25(OH)D (<30 нг/мл) ассоциируется с замедленным восстановлением, снижением силы, включая показатели хватки и прыжка на 5–20%, а также с повышением риска стрессовых переломов, достигающих до 20% спортивных травм, что связано с нарушением остеокластогенеза и синтеза белков [1]. Установлено, что спортивный фенотип является результатом сложного взаимодействия генетических факторов и факторов окружающей среды, при этом наследственные особенности могут оказывать существенное влияние на развитие силы, выносливости, скоростно-силовых качеств и восстановительных процессов после физических нагрузок [2].

Среди генов-кандидатов, принимающих участие в регуляции физической работоспособности, особый интерес представляет ген рецептора витамина D (Vitamin D Receptor, VDR). Рецептор витамина D экспрессируется не только в костной ткани, но и в скелетных мышцах, где участвует в регуляции процессов мышечной дифференцировки, синтеза белка, кальциевого гомеостаза, энергетического обмена и мышечного сокращения. Изменения активности рецептора могут отражаться на мышечной силе, выносливости, составе тела и способности организма адаптироваться к физическим нагрузкам [3]. Полиморфизмы гена VDR — ApaI rs7975232, BsmI rs1544410, TaqI rs731236 и FokI rs10735810 — модулируют ответ организма на витамин D, влияя на экспрессию и функцию рецептора, регулирующего более 2000 генов через геномные, VDRE-зависимые, и негеномные пути [4, 5]. Геномный механизм усиливает синтез кальций-связывающих белков, остеокальцина (BGLAP) и остеоопонтина (SPP1), повышая прочность костной ткани и поддерживая мышечную функцию. Негеномный путь, в свою очередь, активирует кальциевые и MAPK-сигнальные каскады, ускоряя транспорт Ca^{2+} и сокращение мышечных волокон II типа [6, 7]. Полиморфизм FokI влияет на длину VDR-протеина и тем самым изменяет его транскрипционную активность; аллель f (rs10735810) ассоциируется со сниженной чувствительностью к кальцитриолу, что может неблагоприятно отражаться на мышечной силе и костной плотности. ApaI, BsmI и TaqI, расположенные в 3'-UTR, модулируют стабильность мРНК VDR и, следовательно, экспрессию генов FGF23, TGFB1 и ITGB1, связанных с кальциевым обменом, ангиогенезом и миоцитогенезом [8]. У атлетов с аллелями, снижающими VDR-активность, может наблюдаться менее выраженный ответ на супплементацию, что предполагает необходимость более высоких доз — 4000–10 000 МЕ — для достижения целевого уровня 25(OH)D в диапазоне 30–50 нг/мл [10].

Цель исследования. Изучить особенности распределения аллелей и генотипов полиморфизмов rs1544410 (BsmI) и rs2228570 (FokI) гена рецептора витамина D (VDR), а также оценить их взаимосвязь с физической работоспособностью у спортсменов циклических видов спорта Республики Узбекистан. Установлено, что уровень инсоляции и характер тренировочных нагрузок способны модифицировать фенотипическое проявление экспрессию генов системы VDR. В работе представлена оценка потенциала данных полиморфизмов в качестве самостоятельных молекулярно-генетических маркеров для спортивного отбора и прогнозирования адаптационных резервов. Полученные нами результаты вносят важный вклад в понимание популяционной генетики спорта в Узбекистане.

Научная новизна. В рамках настоящего исследования были проанализированы два полиморфных варианта гена рецептора витамина D (VDR): rs1544410 (G>A) и rs2228570 (T>C). Выбор данных генетических маркеров был обусловлен их значимой

ролью в регуляции обмена витамина D, кальций-фосфорного метаболизма, мышечной функции и адаптационных процессов организма при физических нагрузках. Полиморфизм rs1544410 (BsmI) рассматривается как один из наиболее изученных генетических маркеров, ассоциированных с минеральной плотностью костной ткани, особенностями кальциевого обмена, риском стресс-индуцированных повреждений костной ткани и функциональным состоянием мышечной системы.

Материалы и методы. Исследование на базе спортивной организации Республики Узбекистан с участием спортсменов циклических видов спорта, а также лиц контрольной группы. В основную группу исследования были включены 148 спортсменов, среди которых 74 спортсмена высокой квалификации - члены сборной команды Республики Узбекистан, и 74 спортсмена, обучающихся в детско-юношеских спортивных школах (ДЮСШ). Все обследованные спортсмены специализировались в циклических видах спорта, включающих легкую атлетику, велоспорт, а также греблю на байдарках и каноэ. У всех обследуемых проводился комплекс клинико-лабораторных исследований, включающий оценку биохимических показателей минерального обмена и обеспеченности организма витамином D. Лабораторные исследования выполнялись в отделении лабораторной диагностики Республиканского научно-практического центра спортивной медицины при Национальном олимпийском комитете Республики Узбекистан. Для молекулярно-генетического анализа использовали геномную ДНК, выделенную из лимфоцитов периферической крови обследуемых лиц. Генотипирование исследуемых полиморфизмов проводили методом аллель-специфической полимеразной цепной реакции (ПЦР) в режиме реального времени.

Оценка компонентного состава тела обследуемых проводилась методом биоимпедансометрии с использованием анализатора состава тела Tanita MC-780 (Tanita Corporation, Japan). Метод биоимпедансометрии основан на измерении электрического сопротивления биологических тканей организма при прохождении слабого переменного электрического тока через ткани различной плотности и гидратации. На основании полученных данных оценивались показатели композиционного состава тела, отражающие количественное соотношение жировой, мышечной и водной составляющих организма. В рамках исследования анализировались основные показатели компонентного состава тела, включая жировой, мышечный и водный компоненты. Полученные результаты биоимпедансометрического исследования использовались для оценки взаимосвязи компонентного состава тела с уровнем витамина D, показателями минерального обмена, физической работоспособностью и генетическими особенностями обследуемых спортсменов.

Результаты исследования. Перед проведением ассоциативного анализа была выполнена оценка соответствия распределения генотипов полиморфизма VDR rs1544410 (G>A) равновесию Харди-Вайнберга в основной и контрольной группах, а также в подгруппах спортсменов (1-3). В основной группе наблюдалось статистически значимое отклонение распределения генотипов от теоретически ожидаемого ($\chi^2=4,32$; $p=0,04$), аналогичное отклонение было выявлено и в контрольной группе ($\chi^2=5,98$; $p=0,017$).

Таблица 1. Ожидаемые и наблюдаемые частоты распределения аллелей полиморфизма (G>A) гена VDR по PXB в основной группе

Группа	Частота аллелей	
	G	A
Основная группа	0,83	0,17
Контрольная группа	0,75	0,25

Таблица 2. Ожидаемые и наблюдаемые частоты по PXB распределения генотипов полиморфизма (G>A) гена VDR в основной группе

Генотипы	Частота генотипов		χ^2	p	df
	H _{obs}	H _{exp}			
G/G	0.71	0.68	0.13		
G/A	0.24	0.28	1.23		
A/A	0.05	0.03	2.9		
Всего	1	1	4.32	0.04	1

Таблица 3. Ожидаемые и наблюдаемые частоты распределения генотипов полиморфизма (G>A) гена VDR по PXB в группе контроля

Генотипы	Частота генотипов		χ^2	p	df
	H _{obs}	H _{exp}			
G/G	0.59	0.56	0.39		
G/A	0.3	0.37	2.3		
A/A	0.12	0.06	3.33		
Всего	1	1	5.98	0.017	1

В рамках молекулярно-генетического исследования проведен анализ частоты распределения аллелей и генотипов полиморфизма rs1544410 (G>A) гена VDR в основной группе спортсменов, подгруппах спортсменов открытого и закрытого типов спорта и контрольной группе. Полученные результаты представлены в таблицах 4, 5.

Таблица 4. Частота распределения аллелей и генотипов полиморфизма (rs1544410)G>A в гене VDR

№	Группа	Частота аллелей				Частота распределения генотипов					
		G		A		G/G		G/A		A/A	
		n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
1	Основная группа n=148	245	82.8	51	17.2	105	70.9	35	23.6	8	5.4
1.1	Открытый вид спорта n = 91	154	84.6	28	15.4	67	73.6	20	22.0	4	4.4
1.2	Закрытый вид спорта n = 57	91	79.8	23	20.2	38	66.7	15	26.3	4	7.0
2	Контрольная группа n= 122	182	74.6	62	24.4	73	59.8	36	29.5	13	10.7

Таблица 5. Различия в частоте аллельных и генотипических вариантов полиморфизма G>A в гене VDR в основной и контрольной группах

Аллели и генотипы	Количество аллелей и генотипов				χ^2	p	RR	OR	95%CI
	Основная группа		Контрольная группа						
	n	%	n	%					
G	245	82,8	182	74,6	5,4	0,08	1,1	1,6	1,08 - 2,48
A	51	17,2	62	25,4	5,4	0,08	0,9	0,6	0,4 - 0,93
G/G	105	70,9	73	59,8	3,7	0,21	1,2	1,6	0,99 - 2,72
G/A	35	23,6	36	29,5	1,2	0,41	0,8	0,7	0,43 - 1,27
A/A	8	5,4	13	10,7	2,6	0,34	0,5	0,5	0,19 - 1,18

В основной группе спортсменов частота аллеля G составила 82,8%, тогда как аллель A встречался с частотой 17,2%. В подгруппе спортсменов открытого типа спорта частота аллеля G составила 84,6%, а аллеля A - 15,4%. Среди спортсменов закрытого типа спорта соответствующие показатели составили 79,8% и 20,2%. В контрольной группе частота аллеля G была ниже и составила 74,6%, тогда как частота аллеля A достигала 24,4%, данные указаны в таблице 5 и на рисунке 1.

На уровне аллельных частот отмечалась тенденция к более высокой представленности аллеля G среди спортсменов по сравнению с контрольной группой. Наиболее высокая частота G выявлена у спортсменов открытого типа спорта (84,6%), тогда как максимальная частота аллеля A отмечена в контрольной группе (24,4%). Выявленные различия отражают особенности распределения аллельных вариантов в исследуемых группах и могут представлять интерес при оценке их потенциальной связи со спортивным фенотипом.

Рисунок 1. Частота распределения генотипов полиморфизма (rs1544410)G>A в гене VDR



Рисунок 2. Частота распределения генотипов полиморфизма (rs1544410)G>A в гене VDR



Обсуждение. Полученные нами результаты вносят важный вклад в понимание популяционной генетики спорта: Контраст с зарубежными исследованиями: В исследовании Flore et al. (2024) на элитных итальянских футболистах было показано, что именно аллель А полиморфизма rs1544410 ассоциировался с большей мышечной массой голени. В нашей же выборке наблюдается противоположное направление — преобладание аллеля G и генотипа G/G у спортсменов. Причина расхождений подчеркивает популяционную специфичность генетических ассоциаций. Влияние VDR на спортивный фенотип зависит от этнического бэкграунда, характера нагрузок, а главное — от межгеномного взаимодействия и статуса обеспеченности витамином D.

В исследованиях непосредственно спортсменов также получены неодинаковые результаты. Так у спортсменов различных спортивных дисциплин была выявлена связь FokI с риском боли в нижней части спины, причем определенные генотипические варианты ассоциировались с повышенным риском [Cauci S, Migliozi F, Trombetta CS, Venuto I, Saccheri P, Travan L, Chiriaco G. Low back pain and FokI (rs2228570) polymorphism of vitamin D receptor in athletes. BMC Sports Sci Med Rehabil. 2017 Feb 7;9:4. doi: 10.1186/s13102-017-0069-x]. Британские атлеты, как выяснили Close G.L. и соавторы в 2013 году, оказались не в лучшем положении. Среди 61 спортсмена, представляющего регби-лигу, футбол и конный спорт, серьезная нехватка витамина D была отмечена у 7%, а явный дефицит – у 27%. Ещё 26% имели неадекватный уровень. И только у 38% спортсменов статус витамина D можно было назвать нормальным, при этом по-настоящему оптимальная концентрация встречалась лишь у 2% атлетов. Важно отметить, что полный спектр негативных последствий, связанных с недостатком этого витамина, до сих пор остается предметом изучения [4,5].

Заключение. Результаты проведенного исследования показали, что в популяции спортсменов циклических видов спорта Республики Узбекистан наблюдалась более высокая представленность аллеля G и генотипа G/G rs1544410 (BsmI) гена VDR по сравнению с контрольной группой. Наиболее отчетливо данное направление распределения проявлялось у спортсменов открытого типа спорта. Вместе с тем при принятом уровне статистической значимости $p < 0,05$ статистически достоверной ассоциации rs1544410 со спортивным статусом или типом спортивной специализации не установлено. Полученные результаты частично согласуются с данными литературы,

подтверждающими потенциальное участие VDR-зависимых механизмов в формировании мышечной функции и спортивно значимых фенотипов, но одновременно демонстрируют отсутствие универсального характера подобных ассоциаций.

Выводы. Таким образом, выявление исключительно генотипа T/T среди спортсменов циклических видов спорта и лиц контрольной группы Республики Узбекистан представляет интерес как характеристика исследованной популяции. Однако для определения того, является ли такая структура распределения характерной для узбекской популяции в целом, необходимы дополнительные исследования с большей численностью обследованных лиц и независимой популяционной выборкой.

В основной группе спортсменов в настоящем исследовании отмечалось преобладание аллеля G и генотипа G/G rs1544410, причем частота G достигала 83,0%, а G/G - 71,0%. В контрольной группе эти показатели были ниже - 74,5% и 59,8% соответственно. При этом частота аллеля A и генотипов G/A и A/A, напротив, была выше среди лиц контрольной группы. Полученная структура распределения указывает на определенное направление различий между спортсменами и контролем, однако статистический анализ не подтвердил наличие достоверной ассоциации полиморфизма rs1544410 с принадлежностью к группе спортсменов при принятом уровне значимости $p < 0,05$. Подобный результат в целом согласуется с современным представлением о том, что влияние отдельных генетических вариантов на спортивный фенотип является многокомпонентным и относительно небольшим, а вклад одного SNP редко может объяснить вариативность сложных признаков, таких как выносливость, сила или спортивная результативность. Систематический обзор генетических факторов спортивной производительности Appel et al., 2021 показал, что многочисленные полиморфизмы могут быть связаны с выносливостью, силовыми характеристиками и риском травм, однако доказательность таких ассоциаций неоднородна, а результаты отдельных исследований часто не воспроизводятся в различных популяциях [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 Jul 21;12:694411. doi: 10.3389/fphys.2021.694411].

Вторым генетическим маркером, изученным в настоящей работе, являлся полиморфизм rs2228570 (FokI, T>C) гена VDR, кодирующего рецептор витамина D. Данный вариант представляет особый интерес благодаря своему функциональному значению: rs2228570 расположен в области инициации трансляции и способен влиять на структуру и функциональную активность VDR, что потенциально отражается на реализации биологических эффектов витамина D. С учетом участия системы витамин D-VDR в регуляции мышечной функции, костно-мышечного метаболизма и адаптации к физическим нагрузкам rs2228570 рассматривается как потенциальный генетический фактор, связанный с мышечной функцией и физической работоспособностью. Современный систематический обзор отмечает, что именно VDR является наиболее изученным геном витамин-D-зависимого пути в отношении мышечной функции, хотя результаты по отдельным SNP остаются неоднородными [Bollen SE, Bass JJ, Wilkinson DJ, Hewison M, Atherton PJ. The impact of genetic variation within the vitamin D pathway upon skeletal muscle function: A systematic review. *J Steroid Biochem Mol Biol.* 2023 May;229:106266. doi: 10.1016/j.jsbmb.2023.106266. Epub 2023 Feb 21]. В исследованиях спортсменов также получены данные о возможной связи FokI rs2228570 с характеристиками спортивного фенотипа. В частности, у спортсменов различных спортивных дисциплин была выявлена ассоциация определенных вариантов FokI с риском болевого синдрома в поясничном отделе, а более поздние исследования непосредственно рассматривают rs2228570 в связи с мышечной функцией и спортивной

производительностью [Cauci S, Migliozi F, Trombetta CS, Venuto I, Saccheri P, Travan L, Chiriaco G. Low back pain and FokI (rs2228570) polymorphism of vitamin D receptor in athletes. BMC Sports Sci Med Rehabil. 2017 Feb 7;9:4. doi: 10.1186/s13102-017-0069-x; Yang S, Zhang W, Jia M, Chen H. Association between vitamin D receptor gene polymorphisms and athletic performance in Chinese male youth soccer players. PeerJ. 2025 Jul 16;13:e19696. doi: 10.7717/peerj.19696].

В связи с этим включение rs2228570 (FokI) в настоящее исследование было обусловлено его функциональной значимостью для системы VDR и потенциальной связью с состоянием мышечной системы и физической работоспособностью.

Несмотря на биологическую значимость исследуемого полиморфизма, в настоящем исследовании статистически значимых ассоциаций между генотипическими вариантами и исследуемыми фенотипическими признаками выявлено не было ($p > 0,05$). В исследованной выборке выявлено отсутствие генотипической вариативности полиморфизма rs2228570 (FokI), что не позволило оценить его ассоциацию со спортивным статусом и особенностями спортивной специализации статистическими методами. Полученные результаты могут свидетельствовать о том, что в исследуемой выборке спортсменов Республики Узбекистан данный полиморфизм не является значимым генетическим предиктором спортивной выносливости и скоростно-силовых качеств. Вместе с тем отсутствие статистически значимых ассоциаций может быть связано с ограниченным объемом выборки и требует дальнейшего изучения на более крупных популяционных выборках.

Отсутствие полиморфизма rs2228570 в исследованной выборке в пределах проведенного генотипирования представляет определенный популяционный интерес. В литературе частоты генотипов FokI существенно различаются между популяциями. При этом в исследованиях различных этнических групп выявляются все три генотипа - TT, TC и CC, хотя их соотношение может значительно варьировать. В исследовании молодых японцев Tanabe et.al. 2015 были представлены различные варианты FokI, а частота F-аллеля составляла 0,622 [Tanabe R, Kawamura Y, Tsugawa N, Haraikawa M, Sogabe N, Okano T, Hosoi T, Goseki-Sone M. Effects of Fok-I polymorphism in vitamin D receptor gene on serum 25-hydroxyvitamin D, bone-specific alkaline phosphatase and calcaneal quantitative ultrasound parameters in young adults. Asia Pac J Clin Nutr. 2015;24(2):329-35. doi: 10.6133/apjcn.2015.24.2.01]. Современные исследования также демонстрируют, что rs2228570 может иметь потенциальное значение для мышечной функции и спортивных фенотипов, однако результаты остаются неоднозначными.

Систематический обзор генетических вариантов витамин-D-зависимого пути показал низкую воспроизводимость ассоциаций исследованных VDR-полиморфизмов с характеристиками мышечной функции, что подчеркивает необходимость изучения этих вариантов в различных популяциях [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 Sep 4;13(9):3109. doi: 10.3390/nu13093109; Bollen SE, Bass JJ, Wilkinson DJ, Hewison M, Atherton PJ. The impact of genetic variation within the vitamin D pathway upon skeletal muscle function: A systematic review. J Steroid Biochem Mol Biol. 2023 May;229:106266. doi: 10.1016/j.jsbmb.2023.106266. Epub 2023 Feb 21].

В исследованиях непосредственно спортсменов также получены неодинаковые результаты. Так у спортсменов различных спортивных дисциплин была выявлена связь FokI с риском боли в нижней части спины, причем определенные генотипические варианты ассоциировались с повышенным риском [Cauci S, Migliozi F, Trombetta CS, Venuto I, Saccheri P, Travan L, Chiriaco G. Low back pain and FokI (rs2228570) polymorphism

of vitamin D receptor in athletes. BMC Sports Sci Med Rehabil. 2017 Feb 7;9:4. doi: 10.1186/s13102-017-0069-x]. В исследовании китайских юных футболистов Yang et.al.2025, rs2228570 также включался в комплексный анализ связи VDR с показателями спортивной производительности [Yang S, Zhang W, Jia M, Chen H. Association between vitamin D receptor gene polymorphisms and athletic performance in Chinese male youth soccer players. PeerJ. 2025 Jul 16;13:e19696. doi: 10.7717/peerj.19696].

Таким образом, выявление исключительно генотипа Т/Т среди спортсменов циклических видов спорта и лиц контрольной группы Республики Узбекистан представляет интерес как характеристика исследованной популяции. Однако для определения того, является ли такая структура распределения характерной для узбекской популяции в целом, необходимы дополнительные исследования с большей численностью обследованных лиц и независимой популяционной выборкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Skalska M. et al. Vitamin D supplementation and physical activity of young soccer players during high-intensity training // *Nutrients*. — 2019. — Vol. 11, № 2. — P. 349. — DOI: 10.3390/nu11020349.
2. 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 Jul 21;12:694411. doi:
3. Bollen SE, Bass JJ, Wilkinson DJ, Hewison M, Atherton PJ. The impact of genetic variation within the vitamin D pathway upon skeletal muscle function: A systematic review. *J Steroid Biochem Mol Biol*. 2023 May;229:106266. doi: 10.1016/j.jsbmb.2023.106266. Epub 2023 Feb 21.
4. Buitrago C. et al. Role of VDR in 1alpha,25-dihydroxyvitamin D3-dependent non-genomic activation of MAPKs, Src and Akt in skeletal muscle cells // *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology*. — 2013. — Vol. 136. — P. 125–130. — DOI: 10.1016/j.jsbmb.2013.02.013.
5. Usategui-Martín R. et al. Vitamin D receptor (VDR) gene polymorphisms modify the response to vitamin D supplementation: a systematic review and meta-analysis // *Nutrients*. — 2022. — Vol. 14, № 2. — P. 360. — DOI: 10.3390/nu14020360.
6. Саркисян Н. Г. и др. Физиологические механизмы действия витамина D в тканях и органах полости рта и возможность его применения в профилактической стоматологии: обзор литературы // *Человек и его здоровье*. — 2022. — Т. 25, № 3. — С. 42–52. — DOI: 10.21626/vestnik/2022-3/05.
7. Jeon S. M. et al. Exploring vitamin D metabolism and function in cancer // *Experimental & Molecular Medicine*. — 2018. — Vol. 50, № 4. — P. 1–14. — DOI: 10.1038/s12276-018-0038-9.
8. Valtueña J. et al. High prevalence of vitamin D insufficiency among elite Spanish athletes: the importance of outdoor training adaptation // *Nutrición Hospitalaria*. — 2014. — Vol. 30, № 1. — P. 124–131. — DOI: 10.3305/nh.2014.30.1.7539.
9. Close G. L. et al. Assessment of vitamin D concentration in non-supplemented professional athletes and healthy adults during the winter months in the UK: implications for skeletal muscle function // *Journal of Sports Sciences*. — 2013. — Vol. 31, № 4. — P. 344–353. — DOI: 10.1080/02640414.2012.733822.
10. Close G. L. et al. The effects of vitamin D3 supplementation on serum total 25[OH]D concentration and physical performance: a randomised dose-response study // *British Journal of Sports Medicine*. — 2013. — Vol. 47, № 11. — P. 692–696. — DOI: 10.1136/bjsports-2012-091735.

11. Рахимова Н. М. и др. Влияние витамина D на физическую работоспособность в различных видах спорта // Тиббиёт ва спорт. — 2025. — № 2. — С. 128–130.

12. Авезова М. З. и др. Характеристика полиморфизма гена VDR (rs1544410) у профессиональных спортсменов // Актуальные проблемы спортивной науки и медицины: сб. тез. междунар. науч.-практ. конф. Минск, 3 апр. 2025 г. / Респ. науч.-практ. центр спорта; редкол.: И. А. Малёванная [и др.]. — Минск: РНПЦ спорта, 2025. — С. 112.