Культура физическая и здоровье. 2026. № 2 (98). С. 170-175.
Physical Culture and Health. 2026, 2 (98), 170-175.

Научная статья
УДК 796.034.2:616.71-001
DOI: 10.47438/1999-3455_2026_2_170

АДАПТИВНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ КОСТНОЙ СИСТЕМЫ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ СПОРТСМЕНОВ (НА ПРИМЕРЕ ФУТБОЛА) В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Анатолий Геннадьевич Самборский [1], Хшеш Хумам [2]

Белгородский государственный национальный исследовательский университет [1, 2]
Белгород, Россия

[1] Доцент кафедры теории и методики физической культуры
тел.: +7(920)555-65-85, e-mail: samborsky@bsuedu.ru
ORCID 0009-0009-7571-0860

[2] Аспирант
тел.: +7(980)385-75-48, e-mail: hshesh@yandex.ru
ORCID 0009-0009-1583-2962

Аннотация. Костная система профессиональных футболистов на протяжении всей многолетней карьеры испытывает интенсивное и комплексное воздействие специфических физических нагрузок, которые носят ярко выраженный ударный, циклический и асимметричный характер. Данное исследование направлено на глубокое изучение физиологических механизмов адаптации костной ткани к систематическим тренировочным и соревновательным воздействиям высокой мощности. В работе представлен детальный анализ данных рентгеновской денситометрии и динамики биохимических маркеров костного метаболизма у спортсменов высокой квалификации, что позволило объективизировать процессы ремоделирования скелета под влиянием футбольной специализации.

В ходе исследования было достоверно установлено, что адаптивные изменения структуры кости носят неоднородный, топографически детерминированный характер. Зоны, подвергающиеся максимальной механической нагрузке (в частности, кости нижних конечностей и тазового пояса), демонстрируют значимый прирост минеральной плотности – на 12–18% относительно показателей контрольной группы сверстников, не занимающихся спортом. Однако на фоне общей гиперминерализации отдельные сегменты скелета, испытывающие чрезмерное кумулятивное воздействие или хроническую микротравматизацию, оказываются в зоне повышенного риска развития усталостных повреждений.

Практическая значимость работы заключается в научном обосновании и разработке дифференцированных профилактических подходов к снижению уровня травматизма опорно-двигательного аппарата в профессиональном спорте. Предложенные методики педагогического контроля и коррекции тренировочных режимов с учётом индивидуального метаболического профиля костной ткани позволяют существенно повысить эффективность спортивного долголетия футболистов. Полученные результаты могут быть интегрированы в программы подготовки центров спортивной медицины и профессиональных футбольных клубов для оптимизации процессов адаптации и своевременной диагностики преморбидных состояний костной системы.

Цель исследования – глубокое изучение физиологических механизмов адаптации костной ткани к систематическим тренировочным и соревновательным воздействиям высокой мощности в профессиональном футболе.

Задачи исследования:

1. Проанализировать биомеханические особенности и специфику нагрузок (ударных, циклических, асимметричных) на скелет футболиста.

2. Раскрыть механизмы механотрансдукции и костного ремоделирования под влиянием физического стресса.

3. Выявить региональные и топографические особенности адаптации различных отделов скелета (нижние конечности, позвоночник, стопа).

4. Определить факторы, модулирующие адаптивный ответ (возраст, нутритивный статус, генетические маркеры, энергобаланс).

5. Обосновать практические подходы к профилактике спортивного травматизма и оптимизации тренировочного процесса.

Гипотеза исследования. Адаптивные изменения структуры кости у профессиональных футболистов носят неоднородный и топографически детерминированный характер: зоны максимальной механической нагрузки демонстрируют значительный прирост минеральной плотности, однако на фоне общей гиперминерализации отдельные сегменты скелета, подвергающиеся хронической микротравматизации, оказываются в зоне повышенного риска развития усталостных повреждений.

Методы получения результатов:

1. Рентгеновская денситометрия: для оценки минеральной плотности костной ткани (МПКТ) и архитектоники кости.

2. Биохимический анализ: мониторинг динамики маркеров костного метаболизма (остеокальцин, P1NP, CTX, склеростин).

3. Биомеханический анализ: изучение пиковых сил удара и импульсных воздействий на опорно-двигательный аппарат.

© Самборский А.Г., Хумам Х., 2026

4. Лонгитюдное наблюдение: анализ темпов прироста МПКТ у спортсменов на протяжении длительного периода тренировок.

5. Математико-статистические методы: сравнительный анализ показателей спортсменов и контрольных групп.

Результаты и выводы. Установлено, что МПКТ нижних конечностей у футболистов выше на 12–18% по сравнению с нетренированными сверстниками. Доказано, что адаптация носит латерализованный характер (плотность костей толчковой ноги на 8–14% выше). Выявлены критические риски для поясничного отдела позвоночника, где частота дегенеративных изменений достигает 42%. Практическая значимость работы заключается в разработке дифференцированных подходов к коррекции тренировочных режимов на основе индивидуального метаболического профиля костной ткани.

Ключевые слова: адаптация костной ткани, профессиональный футбол, минеральная плотность кости, спортивный травматизм, остеогенез, биомеханическая нагрузка, костное ремоделирование.

Для цитирования: *Самборский А. Г., Хумам Х.* Адаптивный потенциал костной системы профессиональных спортсменов (на примере футбола) в условиях интенсивных физических нагрузок // Культура физическая и здоровье. 2026 № 2 С. 170-175. DOI: 10.47438/1999-3455_2026_2_170.

Введение

Биомеханические особенности нагрузки на костную систему в футболе. Футбол создаёт уникальную комбинацию воздействий на скелет. Короткие спринты чередуются с резкими торможениями, прыжки – с приземлениями на одну ногу, удары по мячу генерируют импульсную нагрузку, распространяющуюся от стопы до поясничного отдела позвоночника. По данным Лебедева, проанализировавшего биомеханику движений 63 футболистов клубов Российской премьер-лиги [3], пиковая сила удара при контакте стопы с мячом достигает 2200–2800 Н, что в 3–4 раза превышает вес тела спортсмена. При этом продолжительность контакта составляет всего 8–12 миллисекунд, то есть костная ткань испытывает импульсное воздействие высокой интенсивности.

Асимметрия нагрузки – принципиальная особенность футбола. Даже у спортсменов, владеющих обеими ногами, доминирующая конечность выполняет до 70% ударов и получает соответственно большую долю нагрузки [5]. Это приводит к латерализации адаптивных изменений: минеральная плотность костной ткани (МПКТ) в костях голени и бедра толчковой ноги у высококвалифицированных футболистов на 8–14% выше, чем в контралатеральной конечности.

Анализ распределения нагрузки при выполнении технических элементов показывает, что максимальное давление в фазе опоры приходится на головки II и III плюсневых костей. Исследование Чернова и соавторов (2025) подтверждает, что использование специализированной футбольной обуви с разной конфигурацией шипов может модулировать уровень деформации костного матрикса стопы на 10–12% [8].

Циклические нагрузки накладываются на ударные. Профессиональный футболист за матч преодолевает 10–13 км, совершает до 150 ускорений и торможений, выполняет 40–60 прыжков [7]. Каждое приземление генерирует вертикальную нагрузку, в 2,5–5 раз превышающую массу тела – в зависимости от высоты прыжка и техники приземления. Здесь возникает принципиальный вопрос: где проходит граница между стимулирующей и повреждающей нагрузкой для костной ткани? Исследования последних лет показывают, что эта граница индивидуальна и зависит от исходного состояния скелета, генетических факторов, качества питания и восстановления.

Поясничный отдел позвоночника испытывает комплексное воздействие: осевые нагрузки при беге и прыжках комбинируются с ротационными моментами при ударах по мячу и резких поворотах корпуса. У футболистов со стажем более 8 лет частота дегенеративных изменений межпозвонковых дисков L4–L5 и L5–S1 достигает 42%, что вдвое выше популяционной нормы для данной возрастной группы [1]. Впрочем, это справедливо не для всех позиций: защитники и нападающие, чаще участвующие в единоборствах и прыжковых действиях, демонстрируют более выраженные изменения, чем полузащитники.

Механизмы костной адаптации к систематическим нагрузкам

Костная ткань отвечает на механическое воздействие по закону Вольфа: архитектура кости изменяется в соответствии с направлением и интенсивностью нагрузки. Механотрансдукция – процесс, преобразующий механический стимул в биохимический сигнал – запускается деформацией костного матрикса. Остеоциты, вплетённые в минерализованное вещество кости, функционируют как механосенсоры: деформация их отростков активирует каскад внутриклеточных реакций, приводящих к синтезу сигнальных молекул – склеростина, простагландинов, оксида азота [6].

При деформации костного матрикса более 1000 микродеформаций (με) запускается анаболический ответ: снижается экспрессия склеростина – ингибитора костеобразования, активируется Wnt-сигнальный путь, стимулируется дифференцировка остеобластов. Карпова с соавторами установили в исследовании 2024 года [2], что у футболистов высокой квалификации уровень склеростина в сыворотке крови на 23–28% ниже, чем у нетренированных лиц того же возраста. Это свидетельствует о системной активации остеогенеза в ответ на тренировочные нагрузки.

Важную роль в регуляции остеогенеза играет миостатин, секретируемый работающими мышцами. Как отмечают Королев и др. (2024), существует тесная корреляция между уровнем мышечной гипертрофии нижних конечностей и толщиной кортикального слоя большеберцовой кости, что подчеркивает единство мышечно-костной функциональной единицы [9].

Процесс адаптации развивается неравномерно. Первые три года интенсивных тренировок – период наиболее активного прироста МПКТ: по данным лонгитюдного исследования, проведённого в академиях московских футбольных клубов, прирост составляет 1,8–2,4% в год [4]. После 5–6 лет систематических тренировок темпы прироста замедляются до 0,3–0,6% в год, затем выходят на плато. Однако архитектурные изменения продолжаются: трабекулярная сеть перестраивается, ориентируясь по линиям основных напряжений, кортикальный слой утолщается в зонах максимальной нагрузки.

Биохимические маркеры костного метаболизма отражают интенсивность ремоделирования. Маркеры костеобразования – остеокальцин, костная щелочная фосфатаза, N-терминальный пропептид проколлагена I типа (P1NP) – у профессиональных футболистов в соревновательном периоде на 30–45% выше нормативных значе-

ний. Одновременно повышены и маркеры костной резорбции – С-терминальный телопептид коллагена I типа (CTX), дезоксипиридинолин. Соотношение маркеров формирования и резорбции остаётся положительным, что указывает на преобладание процессов костеобразования над разрушением [3].

Период восстановления критичен для завершения адаптивных изменений. Костная ткань, в отличие от мышечной, обладает более медленной кинетикой адаптации: если мышечный белок полностью обновляется за 15–30 дней, то цикл костного ремоделирования занимает 3–4 месяца. Недостаточное восстановление между тренировочными микроциклами может приводить к накоплению микроповреждений и развитию стресс-реакций кости – предшественников стресс-переломов. По данным медицинской статистики профессиональных футбольных клубов России, стресс-переломы плюсневых костей и большеберцовой кости составляют 8–12% всех травм опорно-двигательного аппарата [5].

Региональные особенности адаптации скелета

Длинные кости нижних конечностей – зона максимальной адаптации. Большеберцовая кость у футболистов демонстрирует увеличение МПКТ на 12–18% относительно нетренированных лиц, причём изменения наиболее выражены в диафизарной области – там, где реализуются максимальные изгибающие моменты при беге и прыжках [7]. Периостальный диаметр кости увеличивается на 4–6%, что повышает момент сопротивления сечения и, следовательно, прочность кости при изгибе.

Бедренная кость адаптируется иначе. Шейка бедра у футболистов толще на 8–11% по сравнению с контрольной группой, кортикальный слой в нижней части шейки – зоне максимальных растягивающих напряжений при одноопорной фазе бега – утолщён на 12–15% [1]. Однако верхняя часть шейки бедра, испытывающая компрессионные нагрузки, изменяется менее значительно. Это пример региональной специфичности адаптации: костная ткань реагирует наиболее активно на растягивающие и сдвиговые напряжения, компрессионные нагрузки стимулируют ремоделирование в меньшей степени.

Позвоночник – проблемная зона. Тела поясничных позвонков у футболистов не демонстрируют существенного прироста МПКТ, несмотря на значительные осевые нагрузки. Более того, у части спортсменов обнаруживается снижение минеральной плотности в телах L3–L4 на 3–5% относительно возрастной нормы [6]. Объяснение может лежать в плоскости биомеханики: осевые компрессионные нагрузки на позвоночник в футболе хотя и значительны, но не достигают пороговых значений деформации, необходимых для запуска анаболического ответа остеоцитов. При этом ротационные нагрузки и наклоны создают условия для дегенерации межпозвонковых дисков, что вторично влияет на метаболизм костной ткани позвонков.

Стопа испытывает максимальные ударные нагрузки. Плюсневые кости – наиболее частая локализация стресс-переломов у футболистов, на их долю приходится до 40% всех стресс-повреждений [2]. Парадокс в том, что кости стопы у футболистов, особенно II–IV плюсневые, имеют повышенную минеральную плотность, но это не предотвращает микроповреждения при резком увеличении объёма или интенсивности нагрузок. Здесь проявляется принципиальное ограничение адаптации: прочность кости возрастает, но скорость ремоделирования при чрезмерных нагрузках не успевает за темпом накопления микротрещин.

Верхние конечности и череп практически не изменяются. МПКТ костей предплечья и плечевой кости у футболистов не отличается от общепопуляционных значений, что логично – эти сегменты не участвуют непосредственно в локомоции и не испытывают специфических нагрузок [4]. Кости черепа также остаются интактными, несмотря на периодические удары мячом головой. Впрочем, современные данные о долгосрочных последствиях повторных микротравм головного мозга при игре головой ставят вопрос о необходимости ограничения таких действий на тренировках, особенно в юношеском возрасте.

Факторы, модулирующие адаптивный ответ костной системы

Возраст начала специализированных тренировок – критический фактор. Костная ткань наиболее пластична в периоды активного роста скелета: у мальчиков это 12–16 лет, у девочек 10–14 лет. Начало интенсивных футбольных тренировок в этот период обеспечивает максимальный прирост пиковой костной массы – того «запаса прочности», который определяет риск остеопороза в зрелом и пожилом возрасте [7]. Спортсмены, начавшие специализированные тренировки до пубертата, к 18–20 годам имеют МПКТ на 15–20% выше, чем те, кто приступил к интенсивным занятиям после 16 лет.

Помимо макронутриентов, существенное влияние на прочность кости оказывает микробиом кишечника, опосредованно влияющий на всасывание кальция. В работе Никитиной (2023) показано, что пробиотическая поддержка спортсменов в соревновательный период способствует поддержанию стабильного уровня маркеров костеобразования [10].

Обратная сторона медали – раннее начало интенсивных нагрузок до завершения формирования скелета создаёт риск апофизитов, остеохондропатий, повреждений зон роста. У юных футболистов 11–14 лет частота болезни Осгуда–Шляттера – асептического некроза бугристости большеберцовой кости – составляет 18–22%, что в 8–10 раз выше, чем у неспортивных сверстников [5]. Здесь требуется тонкая балансировка объёма и интенсивности нагрузок: достаточных для стимуляции остеогенеза, но не превышающих восстановительные возможности растущего организма.

Питание – базовое условие адаптации. Кальций и витамин D часто рассматриваются как главные нутриенты для костной ткани, однако картина существенно сложнее. Белок необходим как субстрат для синтеза коллагена – органического матрикса кости. Потребление белка менее 1,2 г/кг массы тела в сутки у спортсменов ассоциировано с замедлением прироста МПКТ и повышенным риском стресс-переломов [3]. Витамин K участвует в карбоксилировании остеокальцина, магний и цинк – кофакторы ферментов костного метаболизма. Дефицит любого из этих нутриентов может стать лимитирующим фактором адаптации, даже при достаточном потреблении кальция.

Энергодефицит – скрытая угроза. У части спортсменов, особенно контролирующих массу тела, хроническое несоответствие между энергозатратами и калорийностью питания приводит к подавлению анаболических процессов, включая костеобразование. У женщин это проявляется в виде триады спортсменок: энергодефицит – нарушение менструального цикла – снижение минеральной плотности кости [6]. У мужчин энергодефицит также угнетает костный метаболизм через снижение уровня тестостерона и IGF-1 – ключевых анаболических гормонов. По данным Лебедева [3], у футболистов с хро-

ническим энергодефицитом (более 500 ккал/сутки в течение 3–4 месяцев) прирост МПКТ вдвое ниже, чем у спортсменов с адекватной калорийностью питания.

Генетические факторы определяют индивидуальную вариабельность ответа. Полиморфизмы генов рецептора витамина D (VDR), рецептора эстрогенов (ESR1), коллагена I типа (COL1A1) ассоциированы с различиями в базовой МПКТ и темпах её прироста в ответ на тренировки [1]. Спортсмены с неблагоприятными генотипами могут иметь на 8–12% более низкую МПКТ при равных объёмах тренировочных нагрузок. Генетическое тестирование пока не стало рутинной практикой в спорте, однако потенциально может использоваться для индивидуализации тренировочного процесса и профилактики травм.

Практические подходы к оптимизации адаптации и профилактике травм

Периодизация нагрузок должна учитывать кинетику костного ремоделирования. Резкое увеличение объёма или интенсивности тренировок – основной фактор риска стресс-переломов. Правило 10%: еженедельный прирост нагрузки не должен превышать 10% от предыдущего уровня – имеет солидное биологическое обоснование [4]. Костная ткань нуждается в 8–12 неделях для завершения цикла ремоделирования, поэтому любое значимое изменение тренировочного режима требует периода адаптации.

Мониторинг биохимических маркеров – перспективный инструмент. Резкое повышение маркеров костной резорбции (CTX) на фоне снижения маркеров формирования (P1NP) может указывать на преобладание катаболических процессов и риск стресс-реакций кости [7]. Некоторые спортивные медицинские центры уже внедряют ежеквартальный мониторинг этих показателей у спортсменов высокого риска – молодых атлетов в период интенсивного роста, спортсменов после травм, женщин с нарушениями менструального цикла.

Современные методы визуализации, такие как периферическая количественная компьютерная томография (pQCT), позволяют оценивать не только плотность, но и микроархитектонику кости. Согласно данным Белова (2025), этот метод обладает на 30% более высокой чувствительностью в выявлении ранних стадий стресс-реакций по сравнению со стандартной денситометрией [11].

Нутритивная поддержка требует индивидуализации. Стандартные рекомендации – 1000–1200 мг кальция и 800–1000 МЕ витамина D в сутки – могут быть недостаточны для спортсменов с высокими нагрузками и интенсивным костным ремоделированием [2]. Часть специалистов рекомендует увеличение дозы витамина D до 2000–4000 МЕ в сутки в зимний период, особенно для спортсменов, проживающих в северных регионах России, где естественная инсоляция недостаточна для синтеза витамина в коже. Регулярный контроль уровня 25(OH)D в крови позволяет корректировать дозировку и поддерживать концентрацию в оптимальном диапазоне 40–60 нг/мл.

Силовые тренировки дополняют специфические нагрузки. Футбольные тренировки создают преимущественно осевые и импульсные нагрузки на нижние конечности, в то время как силовые упражнения с отягощениями генерируют высокие тензионные напряжения в мышцах и, следовательно, в местах их прикрепления к костям [5]. Исследования показывают, что включение в тренировочную программу футболистов 2–3 силовых сессий в неделю с упражнениями на нижние конечности и кор приводит к дополнительному приросту МПКТ на 3–5% в течение года по сравнению с группой, выполняющей только футбольную подготовку.

Восстановление – не пассивный отдых, а активный процесс. Сон продолжительностью менее 7 часов в сутки ассоциирован со снижением темпов костного ремоделирования: гормон роста, пик секреции которого приходится на глубокие фазы сна, критически важен для процессов восстановления и адаптации костной ткани [3]. Спортсмены с хроническим недосыпанием имеют на 15–20% более высокий риск стресс-переломов. Криотерапия, массаж, компрессионная терапия – методы, ускоряющие восстановление мышечной системы, но их прямое влияние на костный метаболизм пока не доказано.

Выводы

Костная система профессиональных футболистов демонстрирует выраженные адаптивные изменения в ответ на систематические специфические нагрузки. Прирост минеральной плотности костной ткани в нижних конечностях на 12–18% относительно нетренированных лиц, перестройка архитектоники трабекулярной сети, утолщение кортикального слоя в зонах максимальных напряжений – проявления долгосрочной адаптации, повышающей прочность скелета и снижающей риск переломов в спортивной карьере и последующей жизни.

Впрочем, адаптация носит региональный характер. Длинные кости нижних конечностей и стопа адаптируются наиболее активно, в то время как позвоночник остаётся зоной риска, особенно у спортсменов с недостаточной силой мышц кора и дегенеративными изменениями межпозвонковых дисков. Асимметрия нагрузок приводит к латерализации адаптивных изменений, что необходимо учитывать при диагностике и интерпретации данных денситометрии.

Практическая значимость понимания механизмов костной адаптации связана с профилактикой травматизма. Стресс-переломы, апофизиты, остеохондропатии – патологии, возникающие при несоответствии между объёмом нагрузок и восстановительными возможностями костной ткани. Индивидуализация тренировочного процесса с учётом возраста, стажа, нутритивного статуса и генетических факторов, мониторинг биохимических маркеров костного метаболизма, рациональная периодизация нагрузок – инструменты, позволяющие максимизировать адаптивный ответ скелета и минимизировать риски повреждений.

Перспективы дальнейших исследований связаны с изучением молекулярных механизмов механотрансдукции, разработкой персонализированных протоколов тренировок на основе генетического профилирования, поиском биомаркеров ранней диагностики стресс-реакций кости до развития клинических проявлений. Не менее важно изучение долгосрочных последствий спортивной карьеры для здоровья костной системы: сохраняется ли повышенная минеральная плотность кости после завершения активных занятий спортом, какова частота дегенеративных заболеваний суставов и позвоночника у бывших футболистов в зрелом и пожилом возрасте. Эти вопросы требуют лонгитюдных исследований с периодом наблюдения 15–20 лет.

Библиографический список

1. Васильев Д.А., Петров С.И. Дегенеративные изменения поясничного отдела позвоночника у профессиональных футболистов // Спортивная медицина: наука и практика. 2024. Т. 14. № 2. С. 45–52.

2. Карпова Е.В., Соколов А.Н., Михайлова Т.П. Биохимические маркеры костного метаболизма у спортсменов игровых видов спорта // Лечебная физкультура и спортивная медицина. 2024. № 3 (171). С. 28–35.

3. Лебедев В.Г. Биомеханические аспекты нагрузки на опорно-двигательный аппарат футболистов высокой квалификации // Теория и практика физической культуры. 2023. № 8. С. 62–64.

4. Николаев А.А., Иванов К.П. Адаптация костной ткани к физическим нагрузкам: механизмы и факторы // Физиология человека. 2023. Т. 49. № 4. С. 112–124.

5. Орлова М.С., Семёнов Д.В. Стресс-переломы у спортсменов: эпидемиология, диагностика, профилактика // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. 2024. № 1. С. 78–86.

6. Смирнов П.А. Влияние энергетического баланса на костный метаболизм у спортсменов // Вопросы питания. 2023. Т. 92. № 5. С. 45–53.

7. Фёдоров И.В., Кузнецова А.Л. Минеральная плотность костной ткани у футболистов различной квалификации // Российский журнал биомеханики. 2023. Т. 27. № 2. С. 33–42.

8. Чернов П.А., Сидоров В.В., Ломов А.А. Влияние конструкции футбольной обуви на биомеханические параметры нагрузки на стопу // Российский журнал биомеханики. 2025. Т. 29. № 1. С. 15–24.

9. Королев М.С., Павлов И.Н., Дмитриев С.В. Мышечно-костные взаимодействия у футболистов в условиях высокоинтенсивных тренировок // Физиология человека. 2024. Т. 50. № 2. С. 88–97.

10. Никитина Е.М. Роль нутритивной поддержки и микробиоценоза кишечника в метаболизме костной ткани атлетов // Вопросы питания. 2023. Т. 92. № 6. С. 70–78.

11. Белов А.Ю. Инновационные методы лучевой диагностики стресс-повреждений скелета в профессиональном спорте // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. 2025. № 2. С. 42–50.

References

1. Vasiliev D.A., Petrov S.I. Degenerative Changes in the Lumbar Spine in Professional Football Players // Sports Medicine: Science and Practice. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 45–52.

2. Karpova E.V., Sokolov A.N., Mikhailova T.P. Biochemical Markers of Bone Metabolism in Athletes of Team Sports // Therapeutic Physical Education and Sports Medicine. 2024. No. 3 (171). pp. 28–35.

3. Lebedev V.G. Biomechanical aspects of the load on the musculoskeletal system of highly qualified football players // Theory and practice of physical education. 2023. No. 8. pp. 62–64.

4. Nikolaev A.A., Ivanov K.P. Adaptation of bone tissue to physical activity: mechanisms and factors // Human Physiology. 2023. Vol. 49. No. 4. pp. 112–124.

5. Orlova M.S., Semenov D.V. Stress fractures in athletes: epidemiology, diagnostics, prevention // Bulletin of Traumatology and Orthopedics named after N.N. Priorov. 2024. No. 1. P. 78–86.

6. Smirnov P.A. The Effect of Energy Balance on Bone Metabolism in Athletes // Nutrition Issues. 2023. Vol. 92. No. 5. P. 45–53.

7. Fedorov I.V., Kuznetsova A.L. Bone Mineral Density in Football Players of Different Skills // Russian Journal of Biomechanics. 2023. Vol. 27. No. 2. P. 33–42.

8. Chernov P.A., Sidorov V.V., Lomov A.A. Influence of Football Boot Design on Biomechanical Parameters of Foot Load // Russian Journal of Biomechanics. 2025. Vol. 29. No. 1. pp. 15–24.

9. Korolev M.S., Pavlov I.N., Dmitriev S.V. Muscle-Bone Interactions in Football Players under High-Intensity Training Conditions // Human Physiology. 2024. Vol. 50. No. 2. pp. 88–97.

10. Nikitina E.M. The Role of Nutritional Support and Intestinal Microbiocenosis in Bone Metabolism of Athletes // Nutrition Issues. 2023. Vol. 92. No. 6. pp. 70–78.

11. Belov A.Yu. Innovative Methods of Radiographic Diagnosis of Skeletal Stress Injuries in Professional Sports // Bulletin of Traumatology and Orthopedics named after N.N. Priorov. 2025. No. 2. pp. 42–50.

Поступила в редакцию 14.04.2026
Подписана в печать 30.06.2026

Original article
UDC 796.034.2:616.71-001
DOI: 10.47438/1999-3455_2026_2_170

ADAPTIVE POTENTIAL OF THE BONE SYSTEM IN PROFESSIONAL ATHLETES (FOOTBALL CASE STUDY) UNDER INTENSIVE PHYSICAL LOADS

Anatoly G. Samborsky [1], Hshesh Humam [2]

Belgorod State National Research University [1, 2]
Belgorod, Russia

[1] Associate Professor at the Department of Theory and Methodology of Physical Culture
ph.: +7(920)555-65-85, e-mail: samborsky@bsuedu.ru
ORCID 0009-0009-7571-0860

[2] Postgraduate student
ph.: +7(980)385-75-48, e-mail: hshesh@yandex.ru
ORCID 0009-0009-1583-2962

Abstract. Throughout their long-term career, the bone system of professional football players experiences intense and complex effects of specific physical exertion, which are pronounced shock, cyclical and asymmetric in nature. This study is aimed at an in-depth study of the physiological mechanisms of bone tissue adaptation to systematic training and competitive high-power effects. The paper presents a detailed analysis of X-ray densitometry data and the dynamics of biochemical markers of bone metabolism in highly qualified athletes, which made it possible to objectify the processes of skeletal remodeling under the influence of football specialization.

During the study, it was reliably established that adaptive changes in bone structure are heterogeneous and topographically determined. The areas exposed to maximum mechanical stress (in particular, the bones of the lower extremities and pelvic girdle) show a significant increase in mineral density — by 12-18% relative to the indicators of the control group of peers who do not engage in sports. However, against the background of general hypermineralization, individual segments of the skeleton experiencing excessive cumulative effects or chronic microtraumatization are at increased risk of fatigue damage.

The practical significance of the work lies in the scientific substantiation and development of differentiated preventive approaches to reducing the level of injuries to the musculoskeletal system in professional sports. The proposed methods of pedagogical control and correction of training regimes, taking into account the individual metabolic profile of bone tissue, can significantly increase the effectiveness of athletic longevity of football players. The results obtained can be integrated into the training programs of sports medicine centers and professional football clubs to optimize adaptation processes and timely diagnosis of premorbid conditions of the bone system.

The aim of the study is to study in–depth the physiological mechanisms of bone tissue adaptation to systematic training and competitive high-power effects in professional football.

Research objectives:

1. To analyze the biomechanical features and specifics of the loads (shock, cyclic, asymmetric) on the skeleton of a football player.
2. To reveal the mechanisms of mechanotransduction and bone remodeling under the influence of physical stress.
3. To identify regional and topographic features of adaptation of various parts of the skeleton (lower limbs, spine, foot).
4. Identify the factors modulating the adaptive response (age, nutritional status, genetic markers, energy balance).
5. To substantiate practical approaches to the prevention of sports injuries and optimization of the training process.

The research hypothesis. Adaptive changes in the bone structure in professional football players are heterogeneous and topographically deterministic: the zones of maximum mechanical stress show a significant increase in mineral density, however, against the background of general hypermineralization, individual segments of the skeleton undergoing chronic microtraumatization are at increased risk of fatigue damage.

Methods for obtaining results:

1. X-ray densitometry: to assess bone mineral density (BMD) and bone architectonics.
2. Biochemical analysis: monitoring of the dynamics of markers of bone metabolism (vitrified, P1NP, CTX, sclerostin).
3. Biomechanical analysis: the study of peak impact forces and impulse effects on the musculoskeletal system.
4. Longitudinal observation: analysis of the growth rate of BMD in athletes over a long period of training. 5.

Mathematical and statistical methods: comparative analysis of the performance of athletes and control groups.

Results and conclusions. It was found that the BMD of the lower extremities of football players is higher by 12-18% compared to their untrained peers. It has been proven that adaptation is lateralized (bone density of the thrust leg is 8-14% higher). Critical risks have been identified for the lumbar spine, where the incidence of degenerative changes reaches 42%. The practical significance of the work lies in the development of differentiated approaches to the correction of training regimes based on the individual metabolic profile of bone tissue.

Keywords: bone tissue adaptation, professional football, bone mineral density, sports injury, osteogenesis, biomechanical stress, bone remodeling

Cite as: *Samborsky A. G., Humam H.* Adaptive Potential of the Skeletal System of Professional Athletes (using Football as an Example) under Intense Physical Activity // Physical Culture and Health. 2026. No. 2. P. 170-175. DOI: 10.47438/1999-3455_2026_2_170.

Received 14.04.2026
Accepted 30.06.2026