

ОШИБКИ ВОСПРИЯТИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ И ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ СЛОЖНЫХ ДВИГАТЕЛЬНЫХ ДЕЙСТВИЙ ГИМНАСТКАМИ 10-12 ЛЕТ: МЕТААНАЛИЗ

М.З. Собитова¹, А.С. Крючков^{1,2}, П.Е. Мякинченко¹, Т.В. Фендель²

¹ Федеральный научный центр физической культуры и спорта, Москва, Россия

² Чайковская государственная академия физической культуры и спорта, Чайковский, Россия

Аннотация

Цель исследования: на основе метаанализа исследований, опубликованных в зарубежных рецензируемых журналах уровня Q1 и Q2, сформировать классификацию ошибок восприятия пространственных и временных параметров сложных двигательных действий у юных спортсменок 10-12 лет, занимающихся спортивной гимнастикой.

Методы и организация исследования: Основным методом исследования стал метод метаанализа. В ходе исследования изучали публикации в научных журналах уровня Q1 и Q2 (базы PubMed, Scopus, Web of Science; 2007-2026 гг.). Для количественной валидации выделенных типов ошибок использован метаанализ со случайными эффектами (стандартизированная средняя разность Хеджеса, g), оценкой гетерогенности (I^2) и анализом подгрупп.

Результаты исследования и их обсуждение: Предложена классификация, включающая в себя четыре группы причин ошибок (временные, пространственные, кинестетические, когнитивные), позволяющая выделить 13 специфических видов ошибок. Количественный синтез (N эффектов > 40) показал, что выраженность ошибок детерминирована возрастом и модальностью сенсорного сигнала. Так, например, ошибки временной сложности и изохронности нивелируются к 9-10 годам, тогда как ошибки, связанные с распределением когнитивных ресурсов (внимания, памяти, мышления), требуют экспоненциально больших затрат у детей младшего школьного возраста.

Заключение: Знание ошибок и причин их возникновения является педагогическим инструментом для моторного обучения и совершенствования двигательных действий у юных спортсменок в возрасте 10-12 лет, специализирующихся в спортивной гимнастике.

Ключевые слова: спортивная гимнастика, гимнастки 10-12 лет, моторное обучение, ошибки восприятия, моторная программа, двигательный образ.

ERRORS IN THE PERCEPTION OF SPATIAL AND TEMPORAL PARAMETERS OF COMPLEX MOTOR ACTIONS BY GYMNASTES AGED 10–12 YEARS: META-ANALYSIS

M.Z. Sobitova¹, e-mail: 1999madina@mail.ru, ORCID: 0009-0002-2773-7339

A.S. Kryuchkov^{1,2}, e-mail: kruchkova_an@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9423-8092

P. E. Myakinchenko¹, e-mail: mpe_mail@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2810-3506

T.V. Fendel², e-mail: fendel82@mail.ru, ORCID: 0000-0002-6696-6102

¹ Federal scientific center of physical education and sports, Moscow, Russia

² Tchaikovsky State Physical Education and Sports Academy, Tchaikovsky, Russia

Abstract

Study objective: Based on a meta-analysis of studies published in peer-reviewed journals at the Q1 and Q2 levels, develop a classification of errors in perceiving the spatial and temporal parameters of complex motor actions in young female athletes aged 10–12 engaged in artistic gymnastics.

Study Methods and Organization: The primary research method was meta-analysis. Publications in Q1 and Q2 scientific journals (PubMed, Scopus, and Web of Science databases; 2007-2026) were examined. Random-effects meta-analysis (Hedges' standardized mean difference, g), heterogeneity assessment (I^2), and subgroup analysis were used for quantitative validation of the identified error types.

Study Results and Discussion: A classification is proposed that includes four groups of error causes (temporal, spatial, kinesthetic, and cognitive), allowing for the identification of 13 specific error types. A quantitative synthesis (N effects > 40) showed that the severity of errors is determined by age and sensory modality. For example, errors of temporal complexity and isochrony level out by 9-10 years of age, whereas errors in cognitive resource allocation require exponentially greater expenditures in primary school-aged children.

Conclusion: Knowledge of errors and the reasons for their occurrence is a pedagogical tool for motor learning and the improvement of motor actions in young female athletes aged 10–12 who specialize in artistic gymnastics.

Keywords: sports gymnastics, 10- to 12-year-old gymnasts, motor learning, perceptual errors, motor program, motor imagery.

ВВЕДЕНИЕ

Двигательные действия, характеризующиеся высокой точностью пространственных и временных параметров и необходимостью сложной сенсомоторной интеграции для программирования и управления, составляют основу сложнокоординационных видов спорта. Научные исследования подтверждают, что занятия сложнокоординационными видами спорта, в частности спортивной гимнастикой, предъявляют высокие требования к пространственной и временной точности движений путём интеграции проприоцептивной, зрительной и вестибулярной сенсорной информации [11, 21]. Интеграция сенсорных сигналов выступает основой для формирования образа движений – ментального представления человеком формы движения и его пространственно-временной организации, базирующегося на ощущениях различных переменных движения, но без реального перемещения [7, 18, 28] и активирующего те же нейронные сети, что и фактическое выполнение [2, 20].

Для реализации созданного образа формируется моторная программа управления усилиями скелетных мышц, направленных на перемещение звеньев тела. Сравнение ощущений, лежащих в основе образа, и ощущений, полученных в ходе фактического выполнения движения, позволяют мозгу выявлять сигнал рассогласования и на этой основе вносить коррекции в моторную программу.

При этом многочисленными исследованиями установлено, что при обучении двигательным действиям или их совершенствовании коррекции подвергается не только моторная программа, но и образ движения [5, 15, 16]. Соответственно, двигательные ошибки, допускаемые спортсменом в ходе моторного обучения, могут быть локализованы как на уровне представления о движении, включая пропри-

оцептивные и тактильные ощущения, так и на уровне исполнительного звена (нервно-мышечного аппарата), ответственного за трансформацию образа в конкретную материальную форму движения [15, 22].

В тренировке юных спортсменов, связанной с моторным обучением, у специалистов очень часто возникают организационно-методические трудности по выявлению природы ошибок, допускаемых занимающимися при выполнении упражнений. Одним из путей частичного решения проблемы может явиться определение причин двигательных ошибок путём анализа показателей субъективного восприятия юными спортсменами различных переменных выполняемого упражнения. Для того чтобы такой анализ осуществить, необходимо наличие инструментария, в котором основную диагностическую часть составляет классификатор ошибок.

На сегодняшний день в спортивной гимнастике такой классификатор ошибок на основе кинестетического восприятия движений гимнастками 10-12 лет детально не разработан, но при этом разрозненная группировка двигательных ошибок присутствует в научно-исследовательских работах и публикациях [1, 25, 30, 33].

Цель исследования: на основе метаанализа исследований, опубликованных в зарубежных рецензируемых журналах уровня Q1 и Q2, сформировать классификацию ошибок восприятия пространственных и временных параметров сложных двигательных действий у спортивных гимнасток 10-12 лет.

МЕТОДЫ И ОРГАНИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Стратегия поиска и информационные источники

Поиск литературных источников проведен в трёх базах данных: PubMed, Scopus и Web of

Science. Были выделены следующие ограничения для источников: уровень статьи – Q1 и Q2, английский язык, период с 2016-2026 гг. Несмотря на временное ограничение поискового периода, в анализ также включались ключевые работы, опубликованные ранее (2007-2015 гг.), если они имели принципиальное значение для формирования классификации субъективных ошибок восприятия пространственных и временных параметров сложных двигательных действий. Такие работы рассматривались как классические исследования, заложившие основы концепции моторной образности и ее временных и пространственных искажений у спортсменов. Поисковый запрос комбинировал следующие термины: gymnastics, sport, motor imagery, mental simulation, spatial bias, temporal error, accuracy, response time. Дополнительно проводился ручной поиск литературных источников.

Критерии включения и исключения

Критерии формировались на основе требований PICOS. Итоговые критерии отбора для синтеза классификации были следующие:

- популяция – девочки или смешанные выборки (если данные по девочкам можно выделить) в возрасте 8-14 лет (целевая группа 10-12 лет, но допускалось расширение). Исключались исследования только на взрослых, на мальчиках, без разделения по полу, на лицах с неврологическими нарушениями. Условия непереносимости проведения исследований: исключительно на спортсменках, специализирующихся в спортивной гимнастике, не ставилось – включались исследования по различным видам спорта (и без спортивной специализации при соответствии прочим критериям);
- предмет изучения – моторная образность в любых формах (ментальная хронометрия, мысленное вращение, оценка траектории, кинестетическое воображение). Исключались научные исследования реального двигательного выполнения, но не затрагивающего изучения смысловой и/или кинестетической основы образа движений;
- сравнение – наличие контрольной группы или внутрисубъективное сравнение условий. Исключались исследования без какой-либо формы контроля;
- организация исследования – наличие эм-

пирических исследований, но допускались обзоры, если они имели принципиальное значение для формирования классификации субъективных ошибок восприятия пространственных и временных параметров сложных двигательных действий. Исключались методические статьи и кейс-репорты;

- размер выборки – 20 человек, исключались работы с малыми выборками ($n=10$).

Организация исследования

Отбор и анализ литературных источников проводился в три этапа:

1. Скрининг названий и аннотаций. Первичный поиск выявил 147 статей в базах данных: PubMed, Scopus и Web of Science. После удаления дубликатов ($n = 34$) осталось 113 статей. На этапе скрининга названий и аннотаций исключено 58 статей (не соответствовали критериям включения: возраст, отсутствие моторной образности, малая выборка $n < 20$).
2. Оценка полных текстов. Из 55 оставшихся исследований оценены полные тексты. Исключено 16 статей (недостаточное методологическое качество, отсутствие контрольной группы или внутрисубъективного сравнения).
3. Итоговое включение. Для формирования классификации субъективных ошибок восприятия пространственно-временных параметров включено 22 исследования, соответствующих критериям PICOS. Дополнительно в анализ были включены 17 источников, использованных для теоретического обоснования концепции образа движения, подтверждения сенситивных периодов развития сенсомоторных систем и описания нейронных субстратов моторной образности у детей. Всего в работе использовано 39 источников уровня Q1 и Q2.
4. Оценка качества исследований. Все включенные исследования ($n=39$) имели высокий методологический уровень: они были опубликованы в журналах уровня Q1 и Q2, имели контрольную группу или внутрисубъективное сравнение, размер выборки $n \geq 20$, и использовали валидные методы изучения моторной образности (ментальная хронометрия, мысленное вращение и оценка траектории).
5. Формирование классификации. Проведен нарративный синтез с элементами тематического анализа, который был выполнен по следующей последовательности:

- Кодировка ошибок – из каждого исследования (которые были отобраны для формирования классификации) были выписаны все упомянутые ошибки восприятия пространственно-временных параметров.
- Группировка – схожие феномены ошибок объединены в предварительные категории.
- Кластеризация – выделены четыре группы причин ошибок: временные, пространственные, кинестетические и когнитивные ошибки.
- Основания для выделения четырех групп ошибок – сформированная классификация базируется на разделении ошибок восприятия пространственно-временных параметров движения по двум основным критериям: по сенсорной модальности, в которой возникает искажение, и по уровню обработки информации (перцептивный и когнитивный).
- Проверка насыщенности – достигнута после анализа 22 исследований.
- Критерий валидности – тип ошибки считался подтвержденным, если он выявлен не менее чем в двух независимых исследованиях с выборкой $n=20$ человек.

6. Количественный синтез данных (мета-анализ). Для эмпирической валидации выделенных типов ошибок и оценки величины эффектов был проведен количественный мета-анализ. В качестве первичной метрики использована стандартизированная средняя разность с поправкой Хеджеса (g), что позволило сопоставить данные с разными шкалами измерения (секунды, градусы, баллы). Сводная оценка рассчитана методом обратного взвешивания по дисперсии в модели случайных эффектов. Гетерогенность оценивалась с помощью q-теста Кокрана и I^2 -статистики. При существенной гетерогенности ($I^2 \geq 50\%$) проводился анализ подгрупп по факторам: возраст, сенсорная модальность, нейрокогнитивный статус. Анализ выполнен с использованием авторского шаблона в среде Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе мета-анализа зарубежной литературы уровня Q1 и Q2, опубликованной в период 2007-2026 гг., сформирована классификация субъективных ошибок восприятия пространственно-временных параметров сложных двигательных действий у девочек 10-12 лет в

спортивной гимнастике. Выделены следующие категории:

1. Временные ошибки субъективного восприятия касаются оценки длительности, темпа, ритма, скорости движения и временных интервалов между двигательными действиями. Основание выделения в отдельную категорию – «ощущение времени» – специфика функционирования вестибулярной системы и кортикальных центров обработки информации.

Первый тип – ошибка оценки временной сложности высокоинерционных движений – проявляется в систематическом искажении временных характеристик при ментальной симуляции биомеханически сложных двигательных действий (в частности, движений, требующих координированного вовлечения нескольких суставов), при сохранении адекватной точности оценки временных параметров для простых движений. Данное отклонение может выражаться как в занижении, так и в завышении длительности воображаемого движения в зависимости от индивидуальных особенностей испытуемых или условий выполнения задач [17].

Второй тип – ошибка отсутствия дифференциации по инерционности – характеризуется неспособностью детей различать воображаемое время выполнения движений с различной инерцией, тогда как при фактическом выполнении высокоинерционные движения объективно требуют больше времени. При ментальной симуляции данной возрастной группы отсутствуют значимые различия между воображаемой длительностью простых и сложных движений, что выражается в значениях временных показателей, близких к единице. Отсутствие дифференциации свидетельствует о незрелости центральной нервной системы детей в аспекте формирования точной проприоцептивной репрезентации динамических свойств собственного тела, необходимых для адекватного прогнозирования временных затрат на выполнение двигательных действий.

В отличие от первого типа ошибки, связанной с оценкой временной сложности высокоинерционных движений, при которой дети сохраняют способность к дифференциации простых и сложных движений, при втором

типе ошибок, связанных с дифференциацией движений по инерционности, дети не воспринимают различий между простыми и сложными движениями. Это указывает на проблему формирования у детей внутренней репрезентации инерционности собственного тела, что приводит к «упрощенному» восприятию, а значит и моделированию ими любых движений как одинаковых по времени [17].

Третий тип – ошибка нарушения изохронности – отражает рассогласование между фактическим и воображаемым временем выполнения сложных движений. В норме принцип изохронности моторного воображения предполагает, что длительность реального и воображаемого выполнения одного и того же движения должна быть сопоставима, а увеличение сложности задачи приводит к пропорциональному возрастанию времени как в реальном, так и в воображаемом исполнении. Однако у детей данная закономерность нарушается: при усложнении двигательной задачи воображаемое время может как превышать реальное, так и оказываться меньше него, что указывает на незрелость механизмов прогнозирования временных параметров собственных движений.

Принципиальное отличие третьего типа от первых двух заключается в объекте сравнения и уровне анализа. Первый и второй типы описывают внутреннюю структуру образа движения по временному параметру, при этом третий тип вводит внешний критерий – соответствие воображаемого времени с объективной длительностью выполнения. Таким образом, третий тип оценивает не внутреннюю согласованность моторного воображения, а его сопоставимость с фактическим выполнением, что отражает валидность внутренних моделей времени у детей данного возраста [17, 26].

Четвертый тип – ошибка игнорирования геометрической сложности траектории – неспособность модулировать скорость образа движения в зависимости от кривизны траектории. В сложнокоординационных видах спорта, где траектория движений характеризуется значительной кривизной и изменяющейся геометрией, способность адаптировать темп ментальной симуляции к формальным характеристикам траектории имеет критическое

значение для успешного освоения сложных элементов. Ошибка проявляется в том, что при мысленном воспроизведении движения по криволинейной траектории не происходит замедления темпа, тогда как при фактическом выполнении такой элемент объективно занимает больше времени, чем прямолинейное движение, что приводит к диссоциации между образом и фактическим выполнением.

В отличие от первых двух типов, которые касаются инерционных свойств движений, четвертый тип относится исключительно к временной адаптации к пространственным особенностям траектории. Ключевое отличие заключается в том, что первые три типа оценивают временные параметры независимо от формы траектории, тогда как четвертый тип специфичен для криволинейной траектории. В отличие от третьего типа, который оценивает общее соответствие фактического и воображаемого времени, четвертый тип оценивает локальную временную модуляцию – способность замедлять темп ментального движения на участках с высокой кривизной. Таким образом, четвертый тип отражает не просто временную ошибку, а нарушение взаимодействия между пространственной и временной компонентами моторного образа [24, 29].

Количественное подтверждение временных ошибок

Количественный синтез данных по четырем типам временных ошибок субъективной моторной репрезентации (20 эффектов, $N = 526$) показал, что агрегированные сводные оценки методически не информативны: во всех четырёх типах наблюдается существенная или экстремальная гетерогенность (I^2 от 53,9% до 92,3%), что доказывает жёсткую детерминированность эффектов факторами и условиями проводимых исследований. В этих условиях объединение разнородных эффектов в одну сводную оценку временных ошибок приводит к статистическим артефактам (взаимному «погашению» противоположно направленных эффектов) и маскирует реальные закономерности временного восприятия движений. Поэтому основной единицей анализа выступают подгруппы испытуемых, стратифицированные по ключевым факторам: возраст, нейрокогнитивный статус, тип ошибки/задачи (Таблица 1).

Таблица 1 – Результаты анализа подгрупп по типам временных ошибок
Table 1 – Results of subgroup analysis by types of time errors

Тип ошибки Error type	Подгруппа / условие Subgroup / condition	k эффектов k effects	G[95%ДИ]	p
Временная сложность Time complexity	5 лет 5 years	1	+0,81 [0,09; 1,53]*	0,03
	7 лет 7 years	1	+0,29 [-0,40; 0,98]	0,41
	9 лет 9 years	1	-0,26 [-0,96; 0,44]	0,46
Отсутствие дифференциации по инерционности Lack of differentiation by Inertia	Здоровые дети Healthy children	4	+0,16 [-0,18; 0,50]	0,35
	Дети с НКД Children with NKD	2	-0,97 [-1,44; -0,51]*	< 0,001
Нарушение изохронности Violation of isochronism	5 лет 5 years	1	+0,81 [0,09; 1,53]*	0,03
	7 лет 7 years	1	+0,29 [-0,40; 0,98]	0,41
	9 лет 9 years	1	-0,26 [-0,96; 0,44]	0,46
Игнорирование геометрической сложности Ignoring geometric complexity	Кривизна траектории Curvature of the trajectory	4	0,0 [-0,40; 0,40]	1,00
	Обход препятствия Bypass obstacles	2	+4,54 [3,51; 5,57]*	< 0,001

Примечание: Различия между подгруппами статистически значимы: для типа 2 $Q_{\text{межгрупп}} = 20,54 (p < 0,001)$; для типа 4 $Q_{\text{межгрупп}} = 65,13 (p < 0,001)$. Оценка I^2 и доверительных интервалов при $k=1-2$ имеет ограниченную статистическую точность и должна интерпретироваться с осторожностью

Note: Differences between subgroups are statistically significant: for type 2 Assessment $Q_{\text{межгрупп}} = 20,54 (p < 0,001)$; vor tipe 4 $Q_{\text{межгрупп}} = 65,13 (p < 0,001)$. I^2 and confidence intervals for $k=1-2$ has limited statistical accuracy and should be interpreted with caution

Представленные данные раскрывают три ключевые закономерности:

Во-первых, возраст выступает абсолютным фактором для ошибок временной сложности и нарушения изохронности: выраженность эффектов последовательно снижается от 5 к 9 годам с полной инверсией знака к младшему школьному возрасту. Это согласуется с концепцией поэтапного созревания механизмов моторного прогнозирования: у детей 5 лет ментальная симуляция высокоинерционных движений сопровождается выраженным временным искажением ($g = +0,81$), тогда как к 9 годам формируется способность к более точному внутреннему восприятию времени ($G = -0,26$).

Во-вторых, нейрокогнитивный статус испытуемых выступает критерием проявления ошибки, связанной с отсутствием различимости простых и сложных движений по инерционности. В частности, у детей с нарушением координации развития (НКД) наблюдается существенное расхождение между кинестетической и визуально-пространственными компонентами моторного

образа ($G = -0,97$, $p < 0,001$). Межгрупповые различия между здоровыми детьми и детьми с нарушением координации статистически значимы ($Q_{\text{межгрупп}} = 20,54$, $p < 0,001$), что подтверждает качественный характер различий в обработке ими инерционных процессов.

В-третьих, для ошибки игнорирования геометрической сложности значимый эффект обусловлен исключительно условиями обхода препятствия ($G = +4,54$), тогда как при варьировании кривизны траектории эффект полностью отсутствует ($G = 0,0$). Это указывает на иерархическую организацию моторного образа: базовые геометрические параметры (форма, плавность) кодируются автоматически и не искажаются при ментальной симуляции, тогда как ситуативные ограничения (препятствия) требуют привлечения дополнительных когнитивных ресурсов и «перегружают» систему ментальной репрезентации.

2. Пространственные ошибки субъективного восприятия связаны с искаженным восприятием координат положения звеньев тела,

расстояния, направления, формы траектории и взаимного расположения объектов в пространстве. Основание выделения – зрительная или проприоцептивная сенсорная модальность, отвечающая за пространственные характеристики движения.

Первый тип – ошибка смещения начальной точки траектории. Ошибка проявляется в систематическом искажении пространственного положения тела или его сегментов до начала движения при мысленном воспроизведении двигательного действия. Незрелость механизмов пространственного кодирования приводит к тому, что дети испытывают трудности с точной локализацией положения собственного тела в пространстве относительно внешних ориентиров, что критически важно для успешного выполнения сложно координационных двигательных, требующих точного позиционного контроля в начальной фазе движений [6, 10, 32]. Наличие ошибки восприятия исходного положения тела влечет за собой ошибки в программировании пространственных параметров движения, в том числе его траектории.

Причиной служит несовершенство пространственно-моторных трансформаций – процессов преобразования пространственных координат цели в изменения суставных углов, что требует многократного обновления внутренних моделей движений. В отличие от взрослых дети преимущественно полагаются на обратную связь по ходу движения для коррекции начальной ошибки, а не на упреждающее программирование, что делает их движение более переменчивым и менее точными при первой попытке [6].

Систематическое искажение пространственного положения звеньев тела до начала движения усугубляется биомеханическими ограничениями: поворот конечности в сторону от тела (латеральная ротация) требует большего времени для мысленного воспроизведения, чем поворот к телу (медialная ротация), что указывает на зависимость точности начальной пространственной настройки от биомеханической сложности воображаемого движения [10].

Второй тип – ошибка смещения конечной точки траектории. Ошибка характеризуется систематическим искажением пространственного положения окончания движения при мысленном воспроизведении двигательного действия.

Смещение конечной точки траектории отражает нестабильность внутренней модели движений на этапе его завершения, что проявляется в повышенной вариативности пространственных оценок [8, 9, 32].

Ошибка локализована в конечной финальной части рабочей траектории движения. Спортсмен правильно начинает движение, однако не способен обеспечить точную фиксацию в целевой позиции завершения движения. Данная ошибка представляет собой нарушение финальной точности моторного выполнения. В отличие от ошибки смещения начальной точки смещение конечной точки может быть частично компенсировано в ходе выполнения движения, однако его наличие указывает на дефицит именно контроля финальной фазы движения, что критически важно для формирования правильной финальной позы при выполнении сложнокоординационных упражнений.

Данный тип ошибки отражает нестабильность внутренней модели на этапе завершения движения. Возможные причины включают: ошибки торможения (несвоевременное или неточное прекращение движения), недоучёт инерционных свойств собственного тела, несовершенство сенсорной коррекции в конце движения (например, несоответствие проприоцептивной обратной связи запланированной конечной позы). Эмпирически ошибки смещения начала и конца траектории не всегда коррелируют: ребенок может точно выбирать начальное положение, но систематически ошибаться в завершающей части движения, и наоборот.

Третий тип – асимметричное смещение траектории. Данный тип ошибок проявляется в систематическом смещении восприятия траектории движения в одну из сторон относительно целевого направления. Нейрофизиологической основой данного типа ошибки является межполушарная асимметрия в обработке и передаче сигнала [13, 14, 27].

У детей 10-12 лет индивидуальные различия в чувствительности к движению связаны с противоположным вкладом левого и правого полушарий: высокая структурная развитость правого полушария способствует лучшему восприятию движения, тогда как высокая развитость левого – напротив, может препятствовать. Это подчеркивает сложную латерализацию систем обработки движения в детском возрасте [14].

Количественное подтверждение пространственных ошибок

Количественный синтез данных по трём типам пространственных ошибок (17 эффектов, $N = 356$) показал, что агрегированные сводные оценки не информативны с позиции исследовательского вывода: во всех трёх типах ошибок наблюдается существенная или экстремальная гетерогенность (I^2 от 53,9% до 92,3%), что доказывает детерминированность эффектов фак-

торами и условиями исследований – сенсорной модальностью, разным угловым положением предъявляемого визуального и аудиального стимула, возрастом испытуемых и типом измерения. В этих условиях объединение разнородных эффектов в одну сводную оценку приводит к статистическим артефактам и маскирует реальные закономерности. Поэтому основной единицей анализа выступают подгруппы, стратифицированные по ключевым факторам (Таблица 2).

Таблица 2 – Результаты анализа подгрупп по типам пространственных ошибок
Table 2 – Results of subgroup analysis by types of spatial errors

Тип ошибки Error type	Подгруппа / условие Subgroup / condition	k эффектов k effects	$G[95\%ДИ]$	p
Смещение начальной точки траектории Shifting the starting point of the trajectory	Визуальное прицеливание Visual aiming (IDE-V)	3	+1,02 [0,65; 1,39]*	< 0,001
	Слуховое прицеливание Auditory aiming (IDE-A, 45°)	3	-2,39 [-2,95; -1,83]*	< 0,001
	Слуховое прицеливание Auditory aiming (IDE-A, 135°)	3	+2,28 [1,75; 2,81]*	< 0,001
	Виртуальная стрельба Virtual shooting	1	-0,63 [-1,63; 0,37]	0,22
Смещение конечной точки траектории Shifting the end point of the trajectory	Виртуальная стрельба (боковые и центральные) Virtual shooting (side and center)	1	-0,57 [-1,42; 0,28]	0,19
	Оценка достижимости, 6-7 лет Attainability Assessment, 6-7 years	1	+0,43 [0,05; 0,81]*	0,03
	Оценка достижимости, 8-9 лет Attainability Assessment, 8-9 years	1	+0,63 [0,24; 1,02]*	0,002
	Оценка достижимости, 10-11 лет Attainability Assessment, 10-11 years	1	+0,43 [0,04; 0,82]*	0,03
Асимметричное смещение траектории Asymmetric trajectory shift	Поведенческий Behavioral	1	+0,51 [0,15; 0,87]*	0,005
	Нейроанатомический. Правое Neuroanatomical. Right SLF	1	-0,53 [-0,89; -0,17]*	0,004
	Нейроанатомический. Левое Neuroanatomical. Left SLF	1	+0,43 [0,08; 0,78]*	0,016

Примечание: Различия между группами статистически значимы: для типа 1 $Q_{\text{межгрупп}}=86,92$ ($p \leq 0,001$); для типа 2 $Q_{\text{межгрупп}}=7,89$ ($p = 0,05$); для типа 3 $Q_{\text{межгрупп}}=48,53$ ($p < 0,001$). Оценка I^2 и доверительных интервалов при $k=1$ имеет ограниченную статистическую точность и должна интерпретироваться с осторожностью.
 Note: Differences between groups are statistically significant: for type 1 $Q_{\text{межгрупп}}=86,92$ ($p \leq 0,001$); for type 2 $Q_{\text{межгрупп}}=7,89$ ($p = 0,05$); for type 3. The estimate and confidence intervals for have limited statistical precision and should be interpreted with caution. $Q_{\text{межгрупп}}=48,53$ ($p < 0,001$) I^2 $k=1$

Представленные данные раскрывают три ключевые закономерности:

Во-первых, для ошибки смещения начальной точки траектория, сенсорная модальность и угол предъявления стимула выступают ведущими факторами, определяющими направление и величину искажения. При аудиовизуальном конфликте наблюдается асимметрия в ошибке:

угол 45° дает достоверное смещение ошибки в отрицательном направлении ($G = -2,39$), тогда как угол 135° – в положительном направлении ($G = +2,28$). Визуальная модальность стимула демонстрирует достоверное снижение ошибки движения ($G = +1,02$) вероятно, связанное с особенностями зрительного внимания у детей. Межгрупповые различия между визуальными

и аудиальными условиями двигательной задачи статистически значимы ($Q_{\text{межгрупп}} = 86,92$, $p < 0,001$), что подтверждает качественный характер влияния модальности сенсорного стимула на пространственное программирование движений.

Во-вторых, ошибка смещения конечной точки траектории выявляет чёткую возрастную динамику в задачах точного достижения пространственной цели. Пик переоценки собственных возможностей приходится на возраст 8-9 лет ($G = +0,63$), что согласуется с концепцией поэтапного формирования пространственных репрезентаций: в этом возрасте дети демонстрируют максимальное расхождение между ментальной моделью и реальным перемещением звеньев тела. К 10-11 годам наблюдается тенденция к снижению пространственной ошибки движения в финальной части траектории ($G = +0,43$), что указывает на постепенное созревание механизмов пространственного прогнозирования на основе интеграции сигналов от зрительной и проприоцептивной обратной связи.

В-третьих, асимметричное смещение траектории не достигает значимости на агрегированном уровне, однако внутригрупповой анализ доказывает межполушарную специализацию в обработке сигналов целостного движения. На уровне стратегии двигательного поведения наблюдается преимущество одного из полушарий в задаче восприятия и планирования движения ($G = +0,51$). На нейроанатомическом уровне выявлены противоположно направленные корреляции: в правом верхнем продольном пучке (SLF) высокая фракционная анизотропия (FA – количественный показатель, отражающий пространственную ориентацию и структурированность белого вещества мозга) связана с лучшей чувствительностью к движению ($G = -0,53$), тогда как в левом SLF – с худшей ($G = +0,43$). Это согласуется с моделью доминирования правого полушария в обработке целостного движения, где развитость системы проводящих нейронных сетей напрямую связана с эффективностью двигательного поведения. Межгрупповые различия статистически значимы ($Q_{\text{межгрупп}} = 48,53$, $p < 0,001$).

3. Кинестетические и когнитивные ошибки субъективного восприятия. Группирование кинестетических и когнитивных ошибок в отдельную категорию обосновано принципами

альным отличием их нейронных субстратов и функциональных механизмов от временных и пространственных ошибок. В отличие от временных и пространственных ошибок, которые отражают искажения в перцептивных параметрах двигательного образа (время и пространство соответственно) и связаны с незрелостью специализированных сенсорных систем (вестибулярная и зрительная), кинестетические ошибки возникают на уровне сенсорной интеграции (сенсорная схема тела), а когнитивные ошибки – на уровне исполнительного контроля (префронтальная кора). Таким образом, кинестетические и когнитивные ошибки относятся к высшим уровням сенсомоторной переработки, тогда как временные и пространственные ошибки – к перцептивным уровням, что обосновывает их выделение в отдельные категории классификации.

Важное методологическое уточнение: кинестетические и когнитивные типы ошибок в данном классификаторе рассматриваются не как первичные сенсорные искажения, а как факторы-причины, приводящие к ошибкам в движении. Они отражают неспособность нервной системы адекватно интегрировать внутреннюю схему тела или распределять ментальные ресурсы, что неизбежно ведет к ошибочному выполнению движения.

Первый тип – ошибка недостаточного кинестетического контроля. Ошибка проявляется в неспособности спортсмена в полной мере использовать мышечно-суставные ощущения (кинестетическую информацию) для точной настройки воображаемого движения и его соответствия реальным биомеханическим условиям задачи [12, 19, 23, 31].

Данная ошибка имеет два механизма проявления:

- сенсорный механизм (снижение кинестетической чувствительности) [12, 31],
- моторно-образный механизм (неспособность интегрировать кинестетические ощущения в процесс ментальной симуляции движения) [19, 23].

Различие кинестетической ошибки и ошибок пространственных параметров движения заключается в том, что пространственные ошибки отражают неточность позиционирования движения во внешнем пространстве относительно зрительных и вестибулярных ориентиров.

Кинестетическая ошибка отражает неточность внутреннего ощущения положения и движения суставов, мышечного усилия, инерции без обязательной привязки к внешним объектам.

Недостаточный кинестетический контроль у детей 10-12 лет обусловлен как сниженной чувствительностью к проприоцептивной информации, так и неспособностью эффективно интегрировать эту информацию в процесс ментальной симуляции, что особенно критично для сложных двигательных действий в спортивной гимнастике [12, 31].

Второй тип – ошибка неэффективного распределения когнитивных ресурсов. Ошибка проявляется в том, что ментальная симуляция сложных двигательных действий требует от детей 10-12 лет значительно больших когнитивных усилий по сравнению со взрослыми. Это выражается в субъективной оценке трудности выполнения задач и снижении точности при возрастании сложности элемента [19].

Повышенная когнитивная нагрузка у детей 10-12 лет обусловлена незрелостью префронтальной коры и недостаточной автоматизацией процессов ментальной симуляции, что требует дополнительных ресурсов рабочей памяти и исполнительного контроля [4, 19].

Третий тип – ошибка регуляции когнитивных стратегий. Ошибка проявляется в неспособности спортсмена эффективно адаптировать свои ментальные ресурсы к требованиям двигательной задачи. Ключевым механизмом данной ошибки является рассогласование между доминирующей модальностью моторной об-

разности спортсмена (кинестетическая, внутренне-визуальная или внешне-визуальная) и предлагаемой стратегией обучения [3].

Ошибка регуляции когнитивных стратегий возникает не из-за отсутствия когнитивных ресурсов как таковых, а вследствие неспособности ребенка гибко применять стратегии, не соответствующие его индивидуальному нейрокогнитивному профилю. Это указывает на необходимость индивидуализации тренировочного процесса с учётом доминирующей модальности моторной образности юного спортсмена [3].

Количественное подтверждение кинестетических и когнитивных ошибок

Количественный синтез данных по трём типам кинестетических и когнитивных ошибок (27 эффектов, $N = 1195$) показал, что агрегированные сводные оценки методически неинформативны: во всех трёх типах наблюдается экстремальная гетерогенность (I^2 от 88,8% до 96,9%), что доказывает жёсткую детерминированность эффектов факторами и условиями исследований – возрастом испытуемых, типом задачи, нейрокогнитивным статусом и индивидуальной модальностью моторной образности. В этих условиях объединение разнородных эффектов в одну сводную оценку приводит к статистическим артефактам (взаимному «погашению» противоположно направленных эффектов) и маскирует реальные закономерности. Поэтому основной единицей анализа выступают подгруппы, стратифицированные по ключевым факторам (таблица 3).

Таблица 3 – Результаты анализа подгрупп по типам кинестетических и когнитивных ошибок
Table 3 – Results of the subgroup analysis by types of kinesthetic and cognitive errors

Тип ошибки Error type	Подгруппа / условие Subgroup / condition	k эффектов k effects	G[95%ДИ]	p
Недостаточный кинестетический контроль Insufficient kinesthetic control	Кинестетическая образность Kinesthetic imagery (KI)	4	+0,17 [0,02; 0,32]*	0,03
	Инвентарь моторного воображения Motor Imagery Inventory (IVI)	4	–0,04 [–0,19; 0,11]	0,62
	Корреляция KI с представлением Correlation of KI with representation	2	–0,30 [–0,52; –0,08]*	0,008
	Дети 5-7 лет и взрослые Children 5-7 years old and adults	3	+0,31 [–0,12; 0,74]	0,16
	Дети 8-9 лет и взрослые Children 8-9 years old and adults	2	–0,07 [–0,38; 0,24]	0,66
	Дети 10-13 лет и взрослые Children 10-13 years old and adults	3	–0,15 [–0,35; 0,05]	0,14

Тип ошибки Error type	Подгруппа / условие Subgroup / condition	k эффектов k effects	G[95%ДИ]	p
Неэффективное распределение когнитивных ресурсов Inefficient allocation of cognitive resources	Дети 6-7 лет и взрослые Children 6-7 years old and adults	1	+4,06 [2,95; 5,17]*	
	Дети 8-9 лет и взрослые Children 8-9 years old and adults	1	+2,80 [2,01; 3,59]*	
	Дети 10-11 лет и взрослые Children 10-11 years old and adults	1	+1,63 [0,98; 2,28]*	
	Дети 12-13 лет и взрослые Children 12-13 years old and adults	1	+0,56 [0,01; 1,11]*	0,046
	Подростки (воображаемое против действительного) Teenagers (Imaginary vs. Real)	2	-0,03 [-1,47; 1,41]	0,97
Регуляция когнитивных стратегий Regulation of cognitive strategies	Пациенты после инсульта (неоптимальная стратегия) Post-stroke patients (suboptimal strategy)	2	-0,58 [-0,95; -0,21]*	0,02
	Здоровые взрослые (оптимальная стратегия) Healthy adults (optimal strategy)	2	+2,41 [1,51; 3,31]*	
	Визуальные доминанты Visual dominants	1	-0,78 [-1,42; -0,14]*	0,02
	Кинестетические доминанты Kinesthetic dominants	1	-0,29 [-1,03; 0,45]	0,44
	Внутренние доминанты Internal Dominants (IF)	1	+1,94 [0,88; 3,0]*	
	Внешние доминанты External Dominants (EF)	1	+2,93 [1,81; 4,05]*	

Примечание: Различия между группами статистически значимы: для типа 1 $Q_{\text{межгрупп}} = 89,45$ ($p < 0,001$); для типа 2 $Q_{\text{межгрупп}} = 158,45$ ($p < 0,001$); для типа 3 $Q_{\text{межгрупп}} = 42,15$ ($p < 0,001$). Оценка I^2 и доверительных интервалов при $k=1$ имеет ограниченную статистическую точность и должна интерпретироваться с осторожностью

Note: The differences between the groups are statistically significant: for type 1 $Q_{\text{межгрупп}} = 89,45$ ($p < 0,001$); for type 2 $Q_{\text{межгрупп}} = 158,45$ ($p < 0,001$); for type 3. The estimate and confidence intervals for have limited statistical precision and should be interpreted with caution. $Q_{\text{межгрупп}} = 42,15$ ($p < 0,001$) I^2 $k=1$

Представленные данные раскрывают три ключевые закономерности:

Во-первых, возраст выступает абсолютным фактором для ошибок, связанных с распределением когнитивных ресурсов: разница между детьми и взрослыми во времени ментальной репрезентации последовательно и монотонно снижается от 6-7 лет ($G = +4,06$) к подростковому возрасту ($G = +0,56$). У детей 6-7 лет время выполнения задач моторного воображения в 2,5 раза выше, чем у взрослых (2100 мс против 850 мс), что отражает незрелость нейронных сетей префронтальной коры, отвечающих за автоматизацию ментальной симуляции. К 12-13 годам различия снижаются до умеренного уровня, а у подростков достигают практически полного сближения со взрослыми показателями ($G = -0,03$, $p = 0,97$). Межгрупповые различия статистически значимы ($Q_{\text{межгрупп}} = 158,45$, $p < 0,001$), что подтверждает наличие выраженной

возрастной тенденции созревания когнитивных зон мозга, участвующих в формировании двигательного образа.

Во-вторых, для ошибки недостаточного кинестетического контроля, тип задачи выступает критическим фактором. Кинестетическая образность (КИ) демонстрирует малый, но значимый положительный эффект ($G = +0,17$), тогда как корреляция КИ с бегом на 600 м дает умеренный отрицательный эффект ($G = -0,30$), что свидетельствует о связи более высокой кинестетической образности с лучшими результатами в циклических двигательных задачах (отрицательная корреляция, т.к. меньше время = лучше). Возрастная динамика в задачах «воображение и реальное движение» указывает на постепенное созревание способности к точной ментальной симуляции: у детей 5-7 лет различия со взрослыми максимальны ($G = +0,31$), тогда как к 10-13 годам наблюдается тенденция к сближению

($G = -0,15$). Межгрупповые различия статистически значимы ($Q_{\text{межгрупп}} = 89,45, p < 0,001$).

В-третьих, ошибка регуляции когнитивных стратегий выявляет фундаментальную дихотомию, зависящую от нейрокогнитивного статуса и индивидуальной модальности моторной образности. У здоровых взрослых использование оптимальной стратегии (соответствующей индивидуальной доминанте) даёт выраженный эффект улучшения производительности ($G = +2,41$), тогда как у пациентов после инсульта, применение неоптимальной стратегии приводит к значительному снижению рабочего эффекта выполняемого движения ($G = -0,58$). При этом внешний фокус внимания демонстрирует более выраженный эффект ($G = +2,93$) по сравнению с внутренним ($G = +1,94$), что согласуется с гипотезой о преимуществе внешних ориентиров для автоматизации движений. Отрицательные эффекты у визуальных доминантов ($G = -0,78$) выражены сильнее, чем у кинестетических ($G = -0,29$), что указывает на большую чувствительность визуальной системы к несоответствию моторной стратегии. Межгрупповые различия статистически значимы ($Q_{\text{межгрупп}} = 42,15, p < 0,001$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании систематического обзора и количественного мета-анализа зарубежной литературы уровня Q1 – Q2 ($n = 39$ исследований, > 40 эффектов) сформирована и эмпирически валидирована классификация субъективных ошибок восприятия пространственно-временных параметров сложнокоординационных двигательных действий у девочек 10-12 лет в спортивной гимнастике. Выделены четыре группы причин ошибок: временные, пространственные, кинестетические и когнитивные. Данные мета-анализа доказали, что данные ошибки не являются хаотичными, а подчиняются строгим закономерностям онтогенеза и сенсомоторной интеграции.

В частности, выявлено, что задачи на ментальную хронометрию (оценка временной сложности) являются высокочувствительным индикатором сформированности моторного образа у детей 5-7 лет, тогда как у гимнасток 10-12 лет на первый план выходят ошибки когнитивной регуляции и распределения ресурсов.

Практические рекомендации для тренеров и педагогов:

1. Дифференциация диагностики: при выявлении ошибок в технике выполнения движения, тренеру следует различать ошибки внешней пространственной настройки (ошибка стартовой / конечной точки движения/рабочей позы) и ошибки внутренней кинестетической схемы движения (ошибки восприятия мышечно-суставных ощущений ведущих переменных движения).
2. Учёт когнитивной нагрузки: при разучивании новых сложных элементов юным гимнасткам 10-12 лет требуется экспоненциально больше времени на ментальную симуляцию, чем взрослым. Соответственно, временные паузы для мысленного проигрывания движения должны быть увеличены.
3. Персонализация стратегий: использование внешнего фокуса внимания эффективно для автоматизации движений, однако у спортсменок с выраженной кинестетической или внутренней визуальной доминантой принудительная установка на внешние ориентиры может вызвать когнитивную перегрузку и замедлить сроки моторного обучения. Требуется предварительная персонализированная диагностика модальности сенсорных сигналов, составляющих основу двигательного образа у спортсменок.

Предложенный классификатор может быть интегрирован в систему текущего контроля и педагогического инструментария моторного обучения в спортивной гимнастике.

ЛИТЕРАТУРА:

1. A systematic review of sensorimotor function during adolescence: a developmental stage of increased motor awkwardness? / C. C. Quatman-Yates, C. E. Quatman, A. J. Meszaros [et al.] // British journal of sports medicine. – 2012. – Vol. 46. – №. 9. – pp. 649-655.
2. Brain activation evoked by motor imagery in pediatric patients with complete spinal cord injury / L. Wang, W. M. Zheng, T. F. Liang [et al.] // American Journal of Neuroradiology. – 2023. – Vol. 44. – №. 5. – pp. 611-617.
3. Children's motor imagery modality dominance modulates the role of attentional focus in motor skill learning / M. Bahmani, M. Babak, W. Land [et al.] // Human Movement Science. – 2021. – Vol. 75. – P. 102742.
4. Diamond, A. Close interrelation of motor development and cognitive development and of the cerebellum and prefrontal cortex / A. Diamond // Child development. – 2000. – Vol. 71. – №. 1. – pp. 44-56.
5. Effects of motor imagery training on muscle strength and co-contraction for older adults / W. X. Yao, B. Mammone, S. Ge [et al.] // Frontiers in Psychology. – 2025. – Vol. 16. – P. 1441377.
6. Evidence for multisensory spatial-to-motor transformations in aiming movements of children / B. R. King, F. A.

- Kagerer, J. L. Contreras-Vidal, J. E. Clark // *Journal of neurophysiology*. – 2009. – Vol. 101. – №. 1. – pp. 315-322.
7. Explicit motor imagery for grasping actions in children with spastic unilateral cerebral palsy / A. Errante, F. Bozzetti, S. Sghedoni [et al.] // *Frontiers in neurology*. – 2019. – Vol. 10. – P. 837.
8. Gabbard, C. Estimation of reach in peripersonal and extrapersonal space: a developmental view / C. Gabbard, A. Cordova, D. Ammar // *Developmental Neuropsychology*. – 2007. – Vol. 2. – №. 3. – pp. 749-756.
9. Gabbard, C. Studying action representation in children via motor imagery / C. Gabbard // *Brain and Cognition*. – 2009. – Vol. 71. – №. 3. – pp. 234-239.
10. Gawryszewski, L. G. Mental rotation of anthropoid hands: a chronometric study / L. G. Gawryszewski, C. F. Silva-dos-Santos // *Braz J Med Biol Res*. – 2007. – Vol. 40. – P. 377381.
11. Gross-motor coordination and executive functions development in soccer and artistic gymnastics preadolescent female athletes / F. Silvestri, M. Campanella, L. Marcelli [et al.] // *Journal of functional morphology and kinesiology*. – 2025. – Vol. 10. – №. 1. – P. 85.
12. Guilbert, J. Motor imagery development and proprioceptive integration: Which sensory reweighting during childhood? / J. Guilbert, F. Jouen, M. Molina // *Journal of experimental child psychology*. – 2018. – Vol. 166. – pp. 621-634.
13. Hemispheric asymmetry and callosal integration of visuospatial attention in schizophrenia: a tachistoscopic line bisection study / M. E. McCourt, M. Shpaner, D. C. Javitt, J. J. Fox // *Schizophrenia Research*. – 2008. – Vol. 102. – №. 1-3. – pp. 189-196.
14. Individual differences in children's global motion sensitivity correlate with TBSS-based measures of the superior longitudinal fasciculus / O. Braddick, J. Atkinson, N. Akshoomoff, [et al.] // *Vision research*. – 2017. – Vol. 141. – pp. 145-156.
15. Investigation of the effect of a virtual reality-based imagery training model on muscle activation in athletes / F. Bedir, D. Bedir, H. H. Yilmaz [et al.] // *Frontiers in psychology*. – 2025. – Vol. 16. – P. 1553327.
16. Kinesthetic imagery training of forceful muscle contractions increases brain signal and muscle strength / W. X. Yao, V. K. Ranganathan, D. Alexandre [et al.] // *Frontiers in human neuroscience*. – 2013. – Vol. 7. – P. 561.
17. Mental representation of arm motion dynamics in children and adolescents / L. Crognier, X. Skoura, A. Vinter, C. Papaxanthis // *PloS one*. – 2013. – Vol. 8. – №. 8. – P. e73042.
18. Moran, A. Motor imagery practice and cognitive processes / A. Moran, H. O'Shea // *Frontiers in Psychology*. – 2020. – Vol. 11. – P. 394.
19. Motor imagery development in children: changes in speed and accuracy with increasing age / D. O. Souto, T. K. F. Cruz, P. L. B. Fontes [et al.] // *Frontiers in Pediatrics*. – 2020. – Vol. 8. – P. 100.
20. Neural correlates of action: Comparing meta-analyses of imagery, observation, and execution / R. M. Hardwick, S. Caspers, S. B. Eickhoff, S. P. Swinnen // *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. – 2018. – Vol. 94. – pp. 31-44.
21. Postural control in gymnasts: Anisotropic fractal scaling reveals proprioceptive reintegration in vestibular perturbation / M. Mangalam, I. Seleznev, E. Kolosova [et al.] // *Frontiers in Network Physiology*. – 2024. – Vol. 4. – P. 1393171.
22. Processing of hand-related verbs specifically affects the planning and execution of arm reaching movements / G. Mirabella, S. Iaconelli, S. Spadacenta [et al.] // *PLoS One*. – 2012. – Vol. 7. – №. 4. – P. e35403.
23. Šlosar, L. Developmental trajectories of motor imagery in relation to physical fitness in children aged 7 to 14 years: A 1-year follow-up study / L. Šlosar, K. Pus, U. Marusic // *Journal of experimental child psychology*. – 2025. – Vol. 249. – P. 106115.
24. Smits-Engelsman, B. C. M. Age-related changes in motor imagery from early childhood to adulthood: Probing the internal representation of speed-accuracy trade-offs / B. C. M. Smits-Engelsman, P. H. Wilson // *Human Movement Science*. – 2013. – Vol. 32. – №. 5. – pp. 1151-1162.
25. Spatial and spectral trajectories in typical neurodevelopment from childhood to middle age / B. A. Hunt, S. M. Wong, M. M. Vandewouw [et al.] // *Network Neuroscience*. – 2019. – Vol. 3. – №. 2. – pp. 497-520.
26. Spruijt, S. The ability of 6-to 8-year-old children to use motor imagery in a goal-directed pointing task / S. Spruijt, J. van der Kamp, B. Steenbergen // *Journal of Experimental Child Psychology*. – 2015. – Vol. 139. – pp. 221-233.
27. Tarasi, L. Perceptual bias in motion discrimination is related to asymmetric interhemispheric alpha traveling waves / L. Tarasi, A. Alamia, V. Romei // *Advanced Science*. – 2025. – Vol. 12. – №. 41. – P. e14623.
28. The effects of motor imagery training on performance and mental representation of 7-to 15-year-old gymnasts of different levels of expertise / B. A. Simonsmeier, C. Frank, H. Gubelmann, M. Schneider // *Sport, Exercise, and Performance Psychology*. – 2018. – Vol. 7. – №. 2. – P. 155.
29. The relation between geometry and time in mental actions / C. Papaxanthis, C. Paizis, O. White [et al.] // *PloS one*. – 2012. – Vol. 7. – №. 11. – P. e51191.
30. The use of motor imagery in 6–7-year-old children is not robust: Evidence from two motor imagery tasks / S. Nobusako, T. Tsujimoto, A. Sakai [et al.] // *Human Movement Science*. – 2025. – Vol. 101. – P. 103362.
31. Tseng, Y. T. Motion sense sensitivity of the ankle is abnormal and correlated with motor performance in children with and without a probable developmental coordination disorder / Y. T. Tseng, C. L. Tsai, F. C. Chen // *Human Movement Science*. – 2023. – Vol. 92. – P. 103157.
32. Young children can use their subjective straight-ahead to remap visuo-motor alterations / D. Esposito, J. Miehlsbradt, A. Tonelli [et al.] // *Scientific Reports*. – 2023. – Vol. 13. – №. 1. – P. 6427.
33. Younger is not always better: development of locomotor adaptation from childhood to adulthood / E. V. Vasudevan, G. Torres-Oviedo, S. M. Morton [et al.] // *Journal of Neuroscience*. – 2011. – Vol. 31. – №. 8. – pp. 3055-3065.

REFERENCES:

1. A systematic review of sensorimotor function during adolescence: a developmental stage of increased motor awkwardness? / C. C. Quatman-Yates, C. E. Quatman, A. J. Meszaros [et al.] // *British journal of sports medicine*. – 2012. – Vol. 46. – №. 9. – pp. 649-655.

2. Brain activation evoked by motor imagery in pediatric patients with complete spinal cord injury / L. Wang, W. M. Zheng, T. F. Liang [et al.] // *American Journal of Neuroradiology*. – 2023. – Vol. 44. – №. 5. – pp. 611-617.
3. Children's motor imagery modality dominance modulates the role of attentional focus in motor skill learning / M. Bahmani, M. Babak, W. Land [et al.] // *Human Movement Science*. – 2021. – Vol. 75. – P. 102742.
4. Diamond, A. Close interrelation of motor development and cognitive development and of the cerebellum and prefrontal cortex / A. Diamond // *Child development*. – 2000. – Vol. 71. – №. 1. – pp. 44-56.
5. Effects of motor imagery training on muscle strength and co-contraction for older adults / W. X. Yao, B. Mamone, S. Ge [et al.] // *Frontiers in Psychology*. – 2025. – Vol. 16. – P. 1441377.
6. Evidence for multisensory spatial-to-motor transformations in aiming movements of children / B. R. King, F. A. Kagerer, J. L. Contreras-Vidal, J. E. Clark // *Journal of neurophysiology*. – 2009. – Vol. 101. – №. 1. – pp. 315-322.
7. Explicit motor imagery for grasping actions in children with spastic unilateral cerebral palsy / A. Errante, F. Bozzetti, S. Sghedoni [et al.] // *Frontiers in neurology*. – 2019. – Vol. 10. – P. 837.
8. Gabbard, C. Estimation of reach in peripersonal and extrapersonal space: a developmental view / C. Gabbard, A. Cordova, D. Ammar // *Developmental Neuropsychology*. – 2007. – Vol. 2. – №. 3. – pp. 749-756.
9. Gabbard, C. Studying action representation in children via motor imagery / C. Gabbard // *Brain and Cognition*. – 2009. – Vol. 71. – №. 3. – pp. 234-239.
10. Gawryszewski, L. G. Mental rotation of anthropoid hands: a chronometric study / L. G. Gawryszewski, C. F. Silva-dos-Santos // *Braz J Med Biol Res*. – 2007. – Vol. 40. – P. 377381.
11. Gross-motor coordination and executive functions development in soccer and artistic gymnastics preadolescent female athletes / F. Silvestri, M. Campanella, L. Marcelli [et al.] // *Journal of functional morphology and kinesiology*. – 2025. – Vol. 10. – №. 1. – P. 85.
12. Guilbert, J. Motor imagery development and proprioceptive integration: Which sensory reweighting during childhood? / J. Guilbert, F. Jouen, M. Molina // *Journal of experimental child psychology*. – 2018. – Vol. 166. – pp. 621-634.
13. Hemispheric asymmetry and callosal integration of visuospatial attention in schizophrenia: a tachistoscopic line bisection study / M. E. McCourt, M. Shpaner, D. C. Javitt, J. J. Fox // *Schizophrenia Research*. – 2008. – Vol. 102. – №. 1-3. – pp. 189-196.
14. Individual differences in children's global motion sensitivity correlate with TBSS-based measures of the superior longitudinal fasciculus / O. Braddick, J. Atkinson, N. Akshoomoff, [et al.] // *Vision research*. – 2017. – Vol. 141. – pp. 145-156.
15. Investigation of the effect of a virtual reality-based imagery training model on muscle activation in athletes / F. Bedir, D. Bedir, H. H. Yilmaz [et al.] // *Frontiers in psychology*. – 2025. – Vol. 16. – P. 1553327.
16. Kinesthetic imagery training of forceful muscle contractions increases brain signal and muscle strength / W. X. Yao, V. K. Ranganathan, D. Allexandre [et al.] // *Frontiers in human neuroscience*. – 2013. – Vol. 7. – P. 561.
17. Mental representation of arm motion dynamics in children and adolescents / L. Crognier, X. Skoura, A. Vinter, C. Papaxanthis // *PloS one*. – 2013. – Vol. 8. – №. 8. – P. e73042.
18. Moran, A. Motor imagery practice and cognitive processes / A. Moran, H. O'Shea // *Frontiers in Psychology*. – 2020. – Vol. 11. – P. 394.
19. Motor imagery development in children: changes in speed and accuracy with increasing age / D. O. Souto, T. K. F. Cruz, P. L. B. Fontes [et al.] // *Frontiers in Pediatrics*. – 2020. – Vol. 8. – P. 100.
20. Neural correlates of action: Comparing meta-analyses of imagery, observation, and execution / R. M. Hardwick, S. Caspers, S. B. Eickhoff, S. P. Swinnen // *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. – 2018. – Vol. 94. – pp. 31-44.
21. Postural control in gymnasts: Anisotropic fractal scaling reveals proprioceptive reintegration in vestibular perturbation / M. Mangalam, I. Seleznev, E. Kolosova [et al.] // *Frontiers in Network Physiology*. – 2024. – Vol. 4. – P. 1393171.
22. Processing of hand-related verbs specifically affects the planning and execution of arm reaching movements / G. Mirabella, S. Iaconelli, S. Spadacenta [et al.] // *PLoS One*. – 2012. – Vol. 7. – №. 4. – P. e35403.
23. Šlosar, L. Developmental trajectories of motor imagery in relation to physical fitness in children aged 7 to 14 years: A 1-year follow-up study / L. Šlosar, K. Pus, U. Marusic // *Journal of experimental child psychology*. – 2025. – Vol. 249. – P. 106115.
24. Smits-Engelsman, B. C. M. Age-related changes in motor imagery from early childhood to adulthood: Probing the internal representation of speed-accuracy trade-offs / B. C. M. Smits-Engelsman, P. H. Wilson // *Human Movement Science*. – 2013. – Vol. 32. – №. 5. – pp. 1151-1162.
25. Spatial and spectral trajectories in typical neurodevelopment from childhood to middle age / B. A. Hunt, S. M. Wong, M. M. Vandewouw [et al.] // *Network Neuroscience*. – 2019. – Vol. 3. – №. 2. – pp. 497-520.
26. Spruijt, S. The ability of 6-to 8-year-old children to use motor imagery in a goal-directed pointing task / S. Spruijt, J. van der Kamp, B. Steenbergen // *Journal of Experimental Child Psychology*. – 2015. – Vol. 139. – pp. 221-233.
27. Tarasi, L. Perceptual bias in motion discrimination is related to asymmetric interhemispheric alpha traveling waves / L. Tarasi, A. Alamia, V. Romei // *Advanced Science*. – 2025. – Vol. 12. – №. 41. – P. e14623.
28. The effects of motor imagery training on performance and mental representation of 7-to 15-year-old gymnasts of different levels of expertise / B. A. Simonsmeier, C. Frank, H. Gubelmann, M. Schneider // *Sport, Exercise, and Performance Psychology*. – 2018. – Vol. 7. – №. 2. – P. 155.
29. The relation between geometry and time in mental actions / C. Papaxanthis, C. Paizis, O. White [et al.] // *PloS one*. – 2012. – Vol. 7. – №. 11. – P. e51191.
30. The use of motor imagery in 6-7-year-old children is not robust: Evidence from two motor imagery tasks / S. Nobusako, T. Tsujimoto, A. Sakai [et al.] // *Human Movement Science*. – 2025. – Vol. 101. – P. 103362.
31. Tseng, Y. T. Motion sense sensitivity of the ankle is abnormal and correlated with motor performance in children with and without a probable developmental

- coordination disorder / Y. T. Tseng, C. L. Tsai, F. C. Chen // Human Movement Science. – 2023. – Vol. 92. – P. 103157.
32. Young children can use their subjective straight-ahead to remap visuo-motor alterations / D. Esposito, J. Mielbradt, A. Tonelli [et al.] // Scientific Reports. – 2023. – Vol. 13. – №. 1. – P. 6427.
33. Younger is not always better: development of locomotor adaptation from childhood to adulthood / E. V. Vasudevan, G. Torres-Oviedo, S. M. Morton [et al.] // Journal of Neuroscience. – 2011. – Vol. 31. – №. 8. – pp. 3055-3065.

Заявление об использовании генеративного искусственного интеллекта и технологий с поддержкой искусственного интеллекта в процессе написания. Авторы настоящей работы использовали возможности языковой модели Gemini 3 Pro (Google) в процессе подготовки рукописи. Данная технология применялась для улучшения стилистической четкости и связности текста, его грамматической коррекции и структурирования. Авторы подтверждают, что использование ИИ ограничивалось исключительно редактированием формы изложения. Весь научный контент, интерпретация данных и выводы были сформулированы авторами самостоятельно. Авторы несут полную ответственность за достоверность публикуемого материала.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Собитова Мадина Зарифовна (Sobitova Madina Zarifovna) – аспирант; ФГБУ «Федеральный научный центр физической культуры и спорта», 105005, г. Москва, Елизаветинский пер., д. 10, стр. 1; e-mail: 1999madina@mail.ru; ORCID: 0009-0002-2773-7339

Крючков Андрей Сергеевич (Kryuchkov Andrey Sergeevich) – кандидат педагогических наук, доцент, начальник Национального центра спорта Федерального научного центра физической культуры и спорта; ФГБУ «Федеральный научный центр физической культуры и спорта», 105005, г. Москва, Елизаветинский пер., д. 10, стр. 1; e-mail: kruchkova_an@mail.ru; ORCID: 0000-0001-9423-8092

Мякинченко Павел Евгеньевич (Myakinchenko Pavel Evgenievich) – кандидат педагогических наук, научный сотрудник; ФГБУ «Федеральный научный центр физической культуры и спорта», 105005, г. Москва, Елизаветинский пер., д. 10, стр. 1; e-mail: mpe_mail@mail.ru; ORCID: 0000-0003-2810-3506

Фендель Татьяна Владимировна (Fendel Tatyana Vladimirovna) – кандидат педагогических наук, доцент, проректор по учебно-воспитательной работе; ФГБОУ ВО «Чайковская государственная академия физической культуры и спорта»; 617764, Приволжский Федеральный округ, Пермский край, г. Чайковский, ул. Ленина, 67; e-mail: fendel82@mail.ru; ORCID: 0000-0002-6696-6102

Авторы внесли равноценный вклад в работу / The authors contributed equally to the work

- Поступила в редакцию 21 июня 2026 г.
- Принята к публикации 28 августа 2026 г.
- Submitted to the editorial board on June 21, 2026
- Accepted for publication August 28, 2026

Раскрытие информации о конфликте интересов / Disclosure of conflicts of interest

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The author declare no conflict of interest

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Собитова, М.З. Ошибки восприятия пространственных и временных параметров сложных двигательных действий гимнастками 10-12 лет: метаанализ / М.З. Собитова, А.С. Крючков, П.Е. Мякинченко, Т.В. Фендель // Наука и спорт: современные тенденции. – 2026. – Т. 14, № 3. – С. 103-117. DOI: 10.36028/2308-8826-2026-14-3-103-117

FOR CITATION

Sobitova M.Z., Kryuchkov A.S., Myakinchenko P. E., Fendel T.V. Errors in the perception of spatial and temporal parameters of complex motor actions by gymnastes aged 10–12 years: meta-analysis. Science and sport: current trends., 2026, vol. 14, no. 3. – pp. 103-117. DOI: 10.36028/2308-8826-2026-14-3-103-117

