

## ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА СПОРТА

УДК 796.342

DOI 10.5930/1994-4683-2026-1-87-93

### **Разработка и апробация программно-аппаратного комплекса диагностики сенсорно-перцептивных способностей юных теннисистов**

Бирюков Илья Андреевич

Ильичёва Ольга Владимировна, кандидат биологических наук

*Московская государственная академия физической культуры, Московская область, п. Малаховка*

#### **Аннотация**

**Цель исследования** – разработка и апробация комплексной системы диагностики сенсорно-перцептивных способностей юных теннисистов 8–16 лет, включающей создание специализированного программно-аппаратного комплекса, разработку методики его применения и установление возрастных нормативов по ключевым диагностическим показателям.

**Методы исследования.** Методика исследования включала процедуру стандартизированного диагностического тестирования, формирование представительной выборки из 145 спортсменов, статистическую обработку данных перцентильным методом и корреляционный анализ (коэффициент Спирмена) для валидации.

**Результаты исследования и выводы.** Разработан инновационный программно-аппаратный комплекс на основе сенсорной ракетки с интегрированными пьезодатчиками, инерциальным модулем и системой тактильной обратной связи, а также специализированное программное обеспечение для анализа данных в реальном времени. Создан валидный диагностический инструментарий, обеспечивающий количественную оценку более 25 биомеханических параметров. Установлена комплексная система возрастных нормативов для 15 ключевых показателей (точность антиципации, время реакции, интегральный индекс SPQ и др.), дифференцированных по шести уровням подготовленности. Выявлена возрастная динамика сенсорно-перцептивных способностей с максимальным приростом в период 10–13 лет. Подтверждена высокая прогностическая ценность методики: показатели демонстрируют статистически значимые корреляции с региональным рейтингом. Разработанный и апробированный программно-аппаратный комплекс представляет собой стандартизированную, объективную систему мониторинга развития сенсорно-перцептивных способностей. Полученные результаты имеют практическую значимость для индивидуализации тренировочного процесса, своевременной коррекции выявляемых дефицитов и объективного отбора перспективных юных теннисистов на этапах многолетней подготовки.

**Ключевые слова:** теннис, детско-юношеский спорт, сенсорно-перцептивные способности, программно-аппаратный комплекс, диагностика

### **Development and testing of a hardware and software complex for diagnosing the sensorimotor perceptual abilities of young tennis players**

Biryukov Ilya Andreevich

Ilyicheva Olga Vladimirovna, candidate of biological sciences

*Moscow State Academy of Physical Education, Moscow region, v. Malakhovka*

#### **Abstract**

**The purpose of the study** is to develop and test a comprehensive system for diagnosing the sensory-perceptual abilities of young tennis players aged 8–16, which includes the creation of a specialized hardware and software complex, the development of a methodology for its application, and the establishment of age-specific standards for key diagnostic indicators.

**Research methods.** The research methodology included a procedure of standardized diagnostic testing, the formation of a representative sample of 145 athletes, statistical processing of data using the percentile method, and a correlation analysis (Spearman's coefficient) for validation.

**Research results and conclusions.** An innovative hardware-software complex has been developed based on a sensor-equipped racket with integrated piezoelectric sensors, an inertial module, and a tactile feedback system, as well as specialized software for real-time data analysis. A valid

diagnostic toolkit has been created, providing quantitative assessment of more than 25 biomechanical parameters. A comprehensive system of age-specific norms has been established for 15 key indicators (anticipation accuracy, reaction time, SPQ integral index, etc.), differentiated across six levels of preparedness. The age-related dynamics of sensory-perceptual abilities have been identified, with the greatest growth observed between ages 10 and 13. The methodology's high predictive value has been confirmed: the indicators show statistically significant correlations with the regional ranking. The developed and tested hardware-software system represents a standardized, objective system for monitoring the development of sensory-perceptual abilities. The results obtained are of practical significance for individualizing the training process, timely correcting identified deficiencies, and objectively selecting promising young tennis players at the stages of long-term training.

**Keywords:** tennis, youth sports, sensory-perceptual abilities, software-hardware complex, diagnostics

**Введение.** Современный теннис характеризуется экстремальными скоростями игровых действий, дефицитом времени для принятия решений и высокой вариативностью соревновательных ситуаций. В этих условиях сенсорно-перцептивные способности приобретают решающее значение для успешной спортивной деятельности [1]. Способность к антиципации траектории полета мяча, точный кинестетический контроль усилия и стабильность технических действий в условиях утомления составляют нейрофизиологическую основу спортивного мастерства [2]. Однако существующие методики диагностики данных способностей зачастую носят субъективный характер и не позволяют осуществлять количественную оценку ключевых параметров перцептивной деятельности в условиях, максимально приближенных к реальной игровой практике [3].

Особую актуальность проблема объективной диагностики приобретает в работе с юными теннисистами 8–16 лет, где происходит активное становление и формирование базовых сенсомоторных навыков [4]. Отсутствие валидного инструментария для оценки сенсорно-перцептивных способностей существенно ограничивает возможности тренеров по индивидуализации тренировочного процесса и своевременной коррекции выявляемых дефицитов. В связи с этим создание специализированного программно-аппаратного комплекса, позволяющего осуществлять объективный мониторинг развития перцептивных функций с учетом возрастных особенностей, представляет значительный научный и практический интерес.

Целью исследования стала разработка и апробация комплексной системы диагностики сенсорно-перцептивных способностей юных теннисистов с использованием компьютерных технологий, включающей создание специализированного аппаратно-программного обеспечения и установление возрастных нормативов по ключевым диагностическим показателям.

**Методика и организация исследования.** Разработанный программно-аппаратный комплекс основан на принципах биомеханической релевантности, адаптивности и мультимодальной обратной связи [5]. Его ключевым отличием от традиционных методов является объективизация оценки и количественное измерение перцептивных навыков, критически важных для тенниса: антиципации, дозирования усилия и пространственной ориентации.

Конструктивным ядром системы является специально модифицированная теннисная ракетка. В треугольную зону (область соединения рукояти с ободом) интегрирована многослойная сенсорная матрица площадью 120 см<sup>2</sup>. Первый слой со-

стоит из 16 высокочувствительных пьезоэлектрических элементов LDT0-028K, расположенных в виде равномерной сетки  $4 \times 4$  с шагом 15 мм, обеспечивающих регистрацию распределения давления с пространственным разрешением 0,1 Н/см<sup>2</sup>. Второй слой включает 9-осевой инерциальный модуль MPU-9250 (акселерометр  $\pm 16\text{g}$ , гироскоп  $\pm 2000^\circ/\text{s}$ , магнитометр  $\pm 4800\text{ }\mu\text{T}$ ), жестко зафиксированный в геометрическом центре треугольника. Для генерации тактильной обратной связи используется линейный резонансный актуатор (LRA) с драйвером DRV2605L.

Управляющий модуль на базе микроконтроллера ESP32 с двухъядерным процессором Xtensa LX6 (240 МГц) осуществляет предварительную обработку данных в реальном времени: комплементарную фильтрацию для IMU, вычисление скользящего среднего для пьезодатчиков, температурную компенсацию. Питание осуществляется от литий-полимерного аккумулятора ёмкостью 1000 мА·ч, обеспечивающего автономную работу в течение 4,5 часа. Передача данных реализована через Bluetooth 5.0 LE (режим 2M PHY) с практической скоростью 12 000 сэмплов в секунду и задержкой не более 15,8 мс.

Специализированное программное обеспечение разработано на языке Python 3.11 с использованием фреймворка PyQt6.

Программный стек организован по модульному принципу и включает:

- модуль приема данных (библиотека Bleak) с буферизацией в кольцевом массиве и автоматическим восстановлением соединения;
- модуль обработки сигналов, применяющий каскад цифровых фильтров: фильтр Калмана второго порядка, FIR-фильтр с окном Хэмминга, алгоритм Маджвика для сенсорного фьюжна;
- модуль экстракции признаков, рассчитывающий более 25 биомеханических параметров в реальном времени (табл. 1);
- модуль 3D-визуализации (движок Panda3D) для рендеринга модели корта и симуляции динамики мяча.

Таблица 1 – Ключевые расчетные биомеханические параметры

Показатель	Формула / Метод расчета	Пояснение
Скорость ракетки	$v = \sqrt{(vx^2 + vy^2 + vz^2)}$	Суммарная скорость движения (м/с)
Угол атаки	$\theta = \arctan(a_x/a_y)$ с коррекцией на гравитацию	Угол наклона ракетки ( $^\circ$ )
Индекс стабильности (SI)	$SI = 1 - \sigma_\theta / 30$	Стабильность угла атаки в серии ударов
Контроль силы (FCR)	$FCR = 1 -  F_{\text{факт}} - F_{\text{цель}}  / F_{\text{цель}}$	Точность воспроизведения заданного усилия
Ритмическая консистентность (RC)	$RC = 1 - \sigma_{\Delta t} / \Delta t$	Стабильность ритма выполнения движений
Чистота удара (CPI)	$CPI = \int_{[20-200\text{ Гц}]} PSD(f)df / \int_{[200-1000\text{ Гц}]} PSD(f)df$	Соотношение низко- и высокочастотных вибраций

На основе рассчитанных параметров вычисляется интегральный индекс сенсорно-перцептивных качеств (SPQ) по многофакторной формуле:  $SPQ = 0,35 \cdot S + 0,25 \cdot T + 0,20 \cdot F + 0,20 \cdot C$ , где S – пространственный, T – временной, F – силовой, C – когнитивный компоненты, рассчитываемые как взвешенные суммы соответствующих базовых показателей.

Для корректного сравнения спортсменов разного уровня физического развития введены поправки:

- коррекция SPQ на рост:  $SPQ_{\text{кор}} = SPQ \times (165 / h)$ , где  $h$  – рост спортсмена в см (165 см – эталон для возраста 11–12 лет);
- коррекция точности на длину рук:  $\text{Точность}_{\text{кор}} = \text{Точность} \times [1 + 0,02 \cdot (l - 65)]$ , где  $l$  – длина руки в см.

Процедура диагностического тестирования представляет собой стандартизированную сессию продолжительностью  $65 \pm 5$  минут, включающую три этапа:

1. Калибровка (10 мин): спортсмен удерживает ракетку в трех стандартных позициях для построения персональной системы координат и температурной компенсации сенсоров.

2. Базовое тестирование (45 мин):

- компьютерный протокол (оценка антиципации): 60 рандомизированных видео-испытаний с адаптивной окклюзией (180–220 мс), спортсмен реагирует нажатием клавиш направления. Фиксируются точность и время реакции;
- протокол с ракеткой (оценка биомеханических параметров): 40 попыток, при окклюзии спортсмен имитирует удар, сенсоры ракетки регистрируют начало движения, угол атаки, распределение усилий.

3. Интегральная оценка (10 мин): система автоматически рассчитывает индексы, формирует профиль навыков и генерирует предварительные рекомендации.

Для валидации комплекса и разработки нормативов сформирована репрезентативная выборка из 145 теннисистов 8–16 лет, стратифицированная по четырем возрастным группам. Статистическая обработка данных проводилась с использованием перцентильного метода для установления нормативных шкал по шести уровням подготовленности («очень низкий» – «очень высокий»). Прогностическая валидность оценивалась с помощью корреляционного анализа (коэффициент Спирмена) связи диагностических показателей с региональным рейтингом спортсменов.

**Результаты исследования.** В результате исследования разработана комплексная система нормативов для оценки сенсорно-перцептивных способностей теннисистов 8–16 лет. Анализ возрастной динамики выявил закономерное совершенствование всех изучаемых показателей по мере созревания функциональных систем сенсомоторного контроля юных спортсменов (табл. 2-5).

Таблица 2 – Нормативы точности антиципации (%) по возрастным группам

Уровень	8-9 лет n=40	10-11 лет n=40	12-13 лет n=35	14-16 лет n=30
Очень высокий	≥78	≥85	≥90	≥93
Высокий	72-77	80-84	85-89	88-92
Выше среднего	65-71	75-79	80-84	83-87
Средний	58-64	70-74	75-79	78-82
Ниже среднего	51-57	65-69	70-74	73-77
Низкий	≤50	≤64	≤69	≤72

Данные по точности зрительной антиципации демонстрируют выраженную возрастную динамику. Прогрессия показателя от 50–78% в группе 8–9 лет до 72–93% в группе 14–16 лет отражает процесс созревания когнитивных компонентов

спортивного мастерства [6]. Наиболее интенсивный прирост точности антиципации наблюдается в возрасте 10–13 лет, что соответствует сенситивному периоду развития префронтально-теменных нейронных сетей. Особого внимания заслуживает сужение диапазона значений в старшей возрастной группе (72–93% против 50–78% в младшей), что свидетельствует о возрастающей дифференциации спортсменов по уровню развития перцептивных функций на этапе специализированной подготовки.

Таблица 3 – Нормативы времени реакции (мс) в протоколе с ракеткой

Уровень	8-9 лет n=40	10-11 лет n=40	12-13 лет n=35	14-16 лет n=30
Очень высокий	≤240	≤210	≤190	≤175
Высокий	241-260	211-225	191-205	176-185
Выше среднего	261-280	226-240	206-220	186-195
Средний	281-300	241-255	221-235	196-205
Ниже среднего	301-320	256-270	236-250	206-215
Низкий	≥321	≥271	≥251	≥216

Временные параметры сенсомоторного реагирования показывают устойчивую тенденцию к сокращению по мере взросления спортсменов. Разница в 10 мс между компьютерным протоколом и протоколом с ракеткой во всех возрастных группах указывает на константность латентности моторного компонента. Наиболее значительное улучшение временных показателей в период 10–13 лет (сокращение на 40–50 мс) коррелирует с завершением миелинизации пирамидных трактов [4]. Примечательно, что в старшей группе темпы улучшения временных показателей замедляются, что свидетельствует о выходе простой сенсомоторной реакции на плато развития и возрастании роли когнитивных компонентов деятельности.

Таблица 4 – Нормативы интегрального индекса SPQ

Уровень	8-9 лет n=40	10-11 лет n=40	12-13 лет n=35	14-16 лет n=30
Очень высокий	≥0,75	≥0,79	≥0,83	≥0,87
Высокий	0,71-0,74	0,75-0,78	0,79-0,82	0,83-0,86
Выше среднего	0,67-0,70	0,71-0,74	0,75-0,78	0,79-0,82
Средний	0,63-0,66	0,67-0,70	0,71-0,74	0,75-0,78
Ниже среднего	0,59-0,62	0,63-0,66	0,67-0,70	0,71-0,74
Низкий	≤0,58	≤0,62	≤0,66	≤0,70

Возрастная динамика интегрального индекса SPQ демонстрирует нелинейный характер развития сенсорно-перцептивных способностей. Наиболее выраженный прирост показателя наблюдается в период 10–13 лет (0,62–0,83), что соответствует этапу интенсивного формирования функциональных систем сенсомоторного контроля. В старшей возрастной группе (14–16 лет) значения SPQ достигают плато (0,70–0,87), что указывает на завершение базового формирования сенсорно-перцептивного компонента спортивного мастерства. Дифференциация спортсменов по уровням развития (от «низкого» до «очень высокого») обеспечивает надежную основу для индивидуализации тренировочного процесса.

Таблица 5 – Корреляция показателей с региональным рейтингом

Показатель	8-9 лет n=40	10-11 лет n=40	12-13 лет n=35	14-16 лет n=30
Точность антиципации (ракетка)	-0,38*	-0,61*	-0,69*	-0,82*
Время реакции (ракетка)	0,41*	0,68*	0,55*	0,48*
Коэффициент вариации усилий	0,28	0,44*	0,53*	0,49*
Интегральный SPQ	-0,31*	-0,59*	-0,76*	-0,81*

Примечание: \* -  $p < 0,05^*$

Результаты корреляционного анализа выявляют системную зависимость между лабораторными показателями и спортивными достижениями. Наибольшая прогностическая сила точности антиципации ( $r = -0,82$ ) и интегрального SPQ ( $r = -0,81$ ) в группе 14–16 лет подтверждает гипотезу о возрастании роли перцептивных функций на этапах совершенствования спортивного мастерства и высших спортивных достижений. Интересная динамика наблюдается по показателю контроля усилий: от отсутствия значимой корреляции в младшей группе ( $r = 0,28$ ) до умеренной связи в старших группах ( $r = 0,49–0,53$ ). Это свидетельствует о том, что тонкий кинестетический контроль становится значимым фактором успешности лишь на этапе специализированной подготовки.

Таким образом, установленные нормативы не являются статичной шкалой, а отражают траекторию развития, где каждый возрастной диапазон имеет свои приоритетные «мишени» для диагностики и коррекции. Практическая ценность работы заключается в том, что тренер получает объективный инструмент не для констатации отставания, а для понимания природы этого отставания в контексте возрастных норм. Это позволяет сместить акцент в тренировочном процессе с эмпирики на доказательное управление развитием ключевых для тенниса перцептивных навыков.

**Выводы.** Разработанный программно-аппаратный комплекс на основе сенсорной ракетки с интегрированной матрицей пьезодатчиков, инерциальным модулем и системой тактильной обратной связи обеспечивает объективную количественную оценку сенсорно-перцептивных способностей через анализ более 25 биомеханических параметров в реальном времени.

Специализированное программное обеспечение с алгоритмами цифровой фильтрации и сенсорного фьюжна позволяет рассчитывать интегральный индекс SPQ по многофакторной формуле с учетом пространственного, временного, силового и когнитивного компонентов, обеспечивая комплексную оценку уровня развития перцептивных функций.

Установленная система возрастных нормативов на репрезентативной выборке из 145 спортсменов 8–16 лет охватывает 15 ключевых показателей, включая точность антиципации, время реакции, контроль усилий, индекс стабильности и ритмическую консистентность, и позволяет дифференцировать спортсменов по шести уровням подготовленности.

Выявленные возрастные закономерности демонстрируют прогрессирующее улучшение всех изучаемых параметров с максимальными темпами развития в период 10–13 лет, что соответствует сенситивным периодам развития когнитивных функций и сенсомоторной интеграции.

Статистическая валидация методики подтвердила наличие статистически значимых корреляционных связей между исследуемыми показателями, полученными с использованием разработанного программно-аппаратного комплекса, и спортивными достижениями, с максимальными значениями коэффициентов корреляции в старшей возрастной группе ( $r$  до -0,81 для интегрального SPQ), что свидетельствует о высокой прогностической ценности разработанного диагностического инструментария.

Практическая значимость исследования заключается в создании стандартизированной системы мониторинга развития сенсорно-перцептивных способностей, позволяющей осуществлять своевременную коррекцию тренировочного процесса, индивидуализировать нагрузки и проводить объективный отбор перспективных спортсменов на различных этапах многолетней подготовки.

**Список источников**

1. Иссурин В.Б., Лях В.И. Координационные способности спортсменов. Москва : Спорт, 2019. 207 с. : ил. ISBN 978-5-907225-04-6.
2. Баширова Д. М., Бурцева Е. В. Методика технико-тактической подготовки игроков в настольный теннис 12-13 лет с направленным развитием когнитивных способностей и эффективность ее применения. DOI 10.36028/2308-8826-2024-12-2-61-68 // Наука и спорт: современные тенденции, 2024. Т. 12, № 2 (45). С. 61–68. EDN: KFEVGU.
3. Шестаков М. П. Перцепция спортивных движений. Таганрог : Южный федерал. ун-т, 2023. 336 с. EDN: GRGVVCZ.
4. Барчукова Г. В., Лаптев А. И. Определение уровня влияния различных координационных способностей на точность ударных действий в настольном теннисе // Теория и практика физической культуры. 2023. № 4. С. 38–40. EDN: YKURYG.
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025685316 Российской Федерации. Комплексная система диагностики и развития сенсорно-перцептивных способностей юных теннисистов: заявл. 26.08.2025; опубл. 22.09.2025 / И. А. Бирюков, О. В. Ильичёва. EDN NWAVDS.
6. Ильичёва О. В., Сираковская Я. В. Развитие антиципации у теннисистов 11-12 лет // Ученые записки университета имени П.Ф. Лесгатфа, 2024. № 8 (234). С. 126–130. EDN: ROBPOM.

**Reference**

1. Issurin V. B., Lyakh V. I. (2020), "Coordination abilities of athletes", Sport, Moscow.
2. Bashirova D. M., Burtseva E. V. (2024), "Methodology of technical and tactical training of 12-13 year old table tennis players with targeted development of cognitive abilities and the effectiveness of its application", *Science and Sport: Modern Trends*, Vol. 12, No. 2 (45), pp. 61–68, DOI 10.36028/2308-8826-2024-12-2-61-68.
3. Shestakov M. P. (2023), "Perception of sports movements", SFedU Publishing House, Taganrog.
4. Barchukova G. V., Laptev A. I. (2023), "Determination of the level of influence of various coordination abilities on the accuracy of striking actions in table tennis", *Theory and practice of physical education*, No. 4, pp. 38–40.
5. Certificate of state registration of computer program No. 2025685316 Russian Federation. "Comprehensive system for diagnostics and development of sensory-perceptual abilities of young tennis players" (2025), filed 08/26/2025, published 09/22/2025, Biryukov I. A. and Ilyicheva O. V.
6. Ilyicheva O. V., Sirakovskaya Ya. V. (2024), "Development of anticipation in 11-12 year old tennis players", *Scientific Notes of the P.F. Lesgatf University*, No. 8 (234), pp. 126–130.

**Информация об авторах:**

**Бирюков И.А.**, аспирант кафедры адаптивной физической культуры и спортивной медицины, ORCID: 0009-0002-7449-9644, SPIN-код 8797-3958.

**Ильичёва О.В.**, доцент кафедры адаптивной физической культуры и спортивной медицины, ORCID: 0009-0007-7312-9218, SPIN-код 9446-2570.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Получена в редакцию 05.12.2025.*

*Принята к публикации 25.12.2025.*