

ПРОГНОСТИЧЕСКОЕ КОДИРОВАНИЕ И ПЕРЦЕПТИВНЫЙ ОПЫТ В УПРАВЛЕНИИ СПОРТИВНЫМИ ДВИЖЕНИЯМИ

М.П. ШЕСТАКОВ,
ФГБУ ФНЦ ВНИИФК, г. Москва

Аннотация

В статье приводятся данные исследований использования элитными спортсменами различных стратегий управления движениями при прыжках вверх с места. В исследовании приняли участие высококвалифицированные спортсмены по бобслею ($n = 6$) и прыжкам на лыжах с трамплина ($n = 6$). Для получения данных применялись видеосъемка 18 высокоскоростными камерами Oqus 3+ (Qualisys, Sweden) и две тензометрические платформы AMTI 6000. Использовалась трехмерная скелетно-мышечная модель с 29 степенями свободы в формате C3D. Гипотеза исследования: решение спортсменами одной моторной задачи может осуществляться различными способами организации движения, что определяется накопленным перцептивным опытом выполнения спортсменами основного соревновательного упражнения. Обсуждение результатов показывает, что использование стратегий организации прыжков у спортсменов разных видов спорта можно объяснить внутренними (скрытыми) вероятностными моделями движения, специфическими для каждой спортивной специализации. Высказано предположение, что обучение детей и подростков механизмам управления спортивными движениями на основе перцептивной информации является залогом устойчивой и эффективной спортивной техники в будущем.

Ключевые слова: прыжок вверх, прогностическое кодирование, спортсмены высокой квалификации, управление движением

PREDICTIVE CODING AND PERCEPTUAL EXPERIENCE IN SPORTS MOVEMENT CONTROL

M.P. SHESTAKOV,
VNIIFK, Moscow city

Abstract

The article presents research data on the use of various motion control strategies by elite athletes when jumping up from a standing position. Highly qualified athletes in bobsleigh ($n = 6$) and ski jumping ($n = 6$) took part in the study. To obtain data, video recording was used with 18 high-speed Oqus 3+ cameras (Qualisys, Sweden) and two AMTI 6000 force platforms. A three-dimensional musculoskeletal model with 29 degrees of freedom in C3D format was used. Research hypothesis: the solution of one motor task by athletes can be carried out in various ways of organizing movement, which is determined by the accumulated perceptual experience of athletes performing the main competitive exercise. A discussion of the results shows that the use of jump organization strategies in athletes of different sports can be explained by internal (hidden) probabilistic movement models specific to each sports specialization. It has been suggested that teaching children and adolescents the mechanisms of controlling sports movements based on perceptual information is the key to sustainable and effective sports technique in the future.

Keywords: jump up, predictive coding, elite athletes, motion control.

Введение

В научной литературе по вопросам сознательной деятельности мозг рассматривается как вычислительное устройство, работающее на основе вероятностных прогнозов [1–3]. Рассмотрение вычислительных механизмов мозга позволяет исследователям осуществлять теоретическое описание сознательной деятельности. Для этого разрабатывается соответствующая математическая формализация данных работы ЦНС и дальнейшая биологическая интерпретация эмпирических и модельных данных. В спортивной практике теоретические построения

на основе моделирования сознания должны обеспечить прикладное использование данных моделирования для разработки новых методик технической подготовки спортсменов.

Основой для моделирования функционирования мозга исследователи используют теорию прогностического кодирования (*predictive coding*), которое включает в себя как восприятия, так и действия [1–3]. Впервые прогностическое кодирование было описано в рамках исследований нейрофизиологии восприятия [4]. В про-



гностическом кодировании важная роль отводится двигательному опыту, выраженному в комплексе перцептивных ощущений, воспринимаемых человеком посредством сознательной деятельности.

Прогностическая обработка данных предлагает новое понимание природы, возможностей и структуры сознательного опыта. Опыт рассматривается как механизм, объединяющий предсказание и сенсорные данные. Перцептивный опыт – это не что иное, как процесс, который приводит текущие действия в соответствие с целями и намерениями, позволяя знать определенный набор вариантов действий, которые делает их доступными текущая ситуация. Это отличается от простого выбора действий, которые минимизируют ошибку прогнозирования в будущем.

Основная идея, лежащая в основе прогностического кодирования, заключается в том, что мозг состоит из иерархии уровней, каждый из которых делает прогнозы относительно активности уровня, находящегося непосредственно под ним в иерархии [1]. Эти нисходящие предсказания на каждом уровне сравниваются с активностью и входными данными каждого уровня для формирования ошибок прогнозирования – то есть информации на каждом уровне, которую невозможно было успешно предсказать. Эти ошибки прогнозирования затем передаются вверх, чтобы служить входными данными для более высоких уровней, которые затем могут быть использованы для уменьшения их собственной ошибки прогнозирования.

Теория прогностической обработки данных тесно связана с байесовской концепцией работы мозга. Важная роль в данной концепции отводится априорным убеждениям (*a priori*, букв. «от предшествующего»), сформированным в коре головного мозга на основании предшествующего опыта. В ходе тренировки спортсмена априорные убеждения, т.е. субъективные знания, накопленные о ранее выполненных действиях, сравниваются с поступающими текущими сенсорными данными.

Прогностическое кодирование как подход для анализа управления движением используется в представленной статье. Сделана попытка дать теоретическое объяснение разницы в управлении движениями спортсменами различной спортивной специализации при выполнении тестового задания. Предполагалась высокая вероятность использования специфических элементов основного соревновательного упражнения в обычном, неспецифическом движении. Эта специфичность определяется накопленным перцептивным опытом спортсменами высокой квалификации и проявляется в разных условиях выполнения заданного теста.

Методика исследования

В исследовании приняли участие действующие спортсмены сборных команд России по бобслею ($n = 6$) и прыжкам на лыжах с трамплина ($n = 6$) (табл. 1). Обследование спортсменов проводилось в рамках и по методике периодического этапного тестирования национальных команд. Перед тестированием все участники дали письменное информированное согласие.

Таблица 1

Характеристика спортсменов

Показатель	Вид спорта	
	Бобслей	Прыжки на лыжах с трамплина
	$\bar{X} \pm SD$	
Вес (кг)	108,9 $\pm$ 6,5	69,1 $\pm$ 1,7
Рост (м)	1,89 $\pm$ 2,5	1,78 $\pm$ 2,1
Индекс массы тела (м/кг ²)	30,4 $\pm$ 7,8	20,3 $\pm$ 2,8
Процент мышц в теле (%)	49,1 $\pm$ 8,1	51,6 $\pm$ 2,4
Стаж занятий (лет)	11,4 $\pm$ 2,8	8,9 $\pm$ 2,2

После стандартной разминки испытуемые выполняли вертикальные прыжки: из основной стойки прыжки вверх после спрыгивания вниз с высоты 0,10 м; 0,30 м и 0,50 м. Все прыжки выполнялись без замаха руками. Во время прыжков испытуемым советовали носить предпочтительную ими спортивную обувь и держать руки на бедрах на протяжении всего упражнения. Период отдыха между испытаниями составлял 2–3 мин в зависимости от индивидуальных потребностей спортсмена. Лучшая из трех попыток, касающаяся высоты прыжка (подъем общего центра масс тела – ОЦМТ), рассматривалась для дальнейшего анализа. Программный комплекс получал входные данные реального движения от системы Qualisys Motion Capture System (18 камер Oqus 3 Qualisys, Швеция) с частотой дискретизации 400 Гц относительно лабораторной системы координат.

Прыжковые упражнения выполнялись на двух тензометрических платформах AMTI 6000 (AMTI, США) с частотой дискретизации 1000 Гц, по одной на каждую ногу. Силовые данные платформ были уменьшены до 400 Гц и синхронизированы по времени с кинематическими данными. Перед экспериментальной процедурой силовые платформы и камеры были откалиброваны в соответствии с рекомендациями производителя. 54 светоотражающих маркера диаметром 1 см крепились на сегментах тела испытуемых. Данные собирались в течение 5 с, записывались и сохранялись в формате C3D. Кинематические и динамические расчеты индивидуальной модели с 29 степенями свободы опорно-двигательного аппарата каждого спортсмена были выполнены с использованием моделирования модели всего тела, предложенной в статье Hamner S.R. и Delp S.L. [5].

T-критерий Уилкоксона – непараметрический тест для парных выборок – использовался для сравнения средних значений переменных, зафиксированных при прыжках в разных условиях выполнения в каждой группе. Непараметрический статистический критерий *U*-критерий Манна – Уитни использовался для оценки различий между двумя группами по уровню какого-либо признака. Расчеты проводились в системе R-studio с использованием пакетов “Ggplot2-ru” и “Caret”. Значение $p < 0,05$ использовалось для указания статистической значимости всех тестов.



Результаты исследования

Выполнение тестовой процедуры прыжка вверх с места из разных положений для спортсменов является стандартным тестом, начиная со времени ранних занятий спортом. Движения являются привычными и не составляют труда для выполнения с точки зрения

координационной сложности, что говорит об отсутствии специфичности. Сравнительный анализ прыжков вверх с места проводился по кинематическим и временным показателям для бобслеистов и прыгунов на лыжах с трамплина.

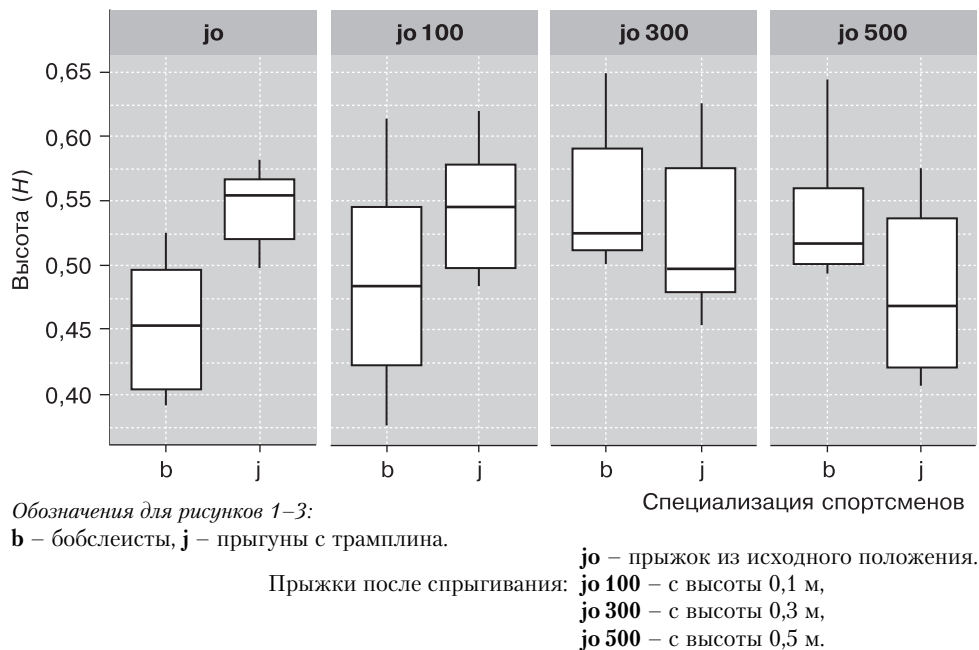


Рис. 1. Значения высоты перемещения ОЦМТ спортсменов в различных прыжках

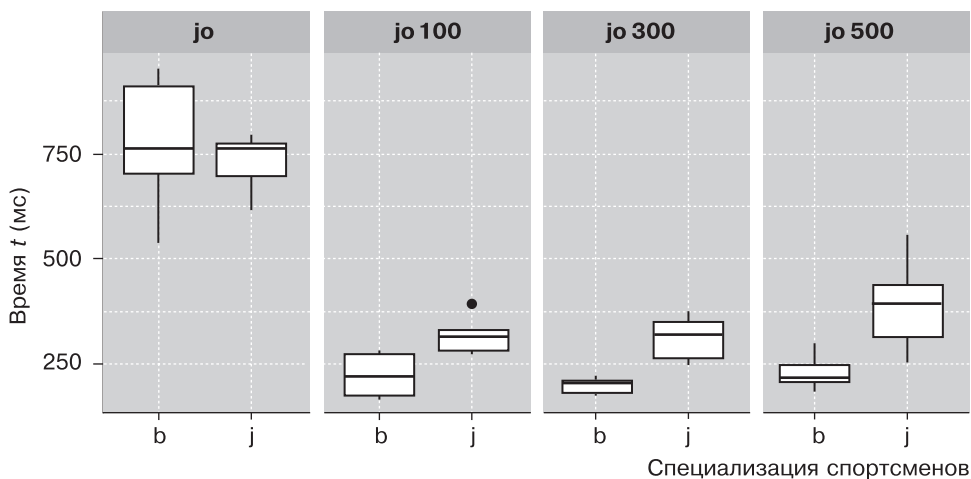


Рис. 2. Время выполнения отталкивания в различных прыжках

Время выполнения отталкивания (рис. 2) у бобслеистов при спрыгивании практически не меняется ($t = 1,361$), независимо от высоты тумбы, и близко к среднему времени ($0,215 \pm 0,55$ с). У прыгунов на лыжах с трамплина по мере увеличения высоты спрыгивания происходит достоверное увеличение времени отталкивания (для **jo** и **jo 100**: $t = -2,2419$; для **jo 100** и **jo 300**: $t = -2,882$; для **jo 300** и **jo 500**: $t = -2,401$). Для выполнения прыжка в высоту вверх из исходного положения время отталкивания для обеих групп не различается ($U = 0,6405$) и составляет в среднем $0,750 \pm 0,090$ с.

Значительная разница между группами наблюдается в значениях углового показателя коленных суставов в нижней точке траектории ОЦМТ, т.е. в начале фазы отталкивания. У бобслеистов не отмечено достоверного изменения средних значений данного показателя при выполнении прыжков из разных положений. Другую картину можно наблюдать у прыгунов на лыжах с трамплина, у которых по мере изменения высоты угол в коленных суставах становится достоверно более острым (для **jo** и **jo 100**: $t = 2,2111$; для **jo 100** и **jo 300**: $t = 2,2014$; для **jo 300** и **jo 500**: $t = 2,2013$).



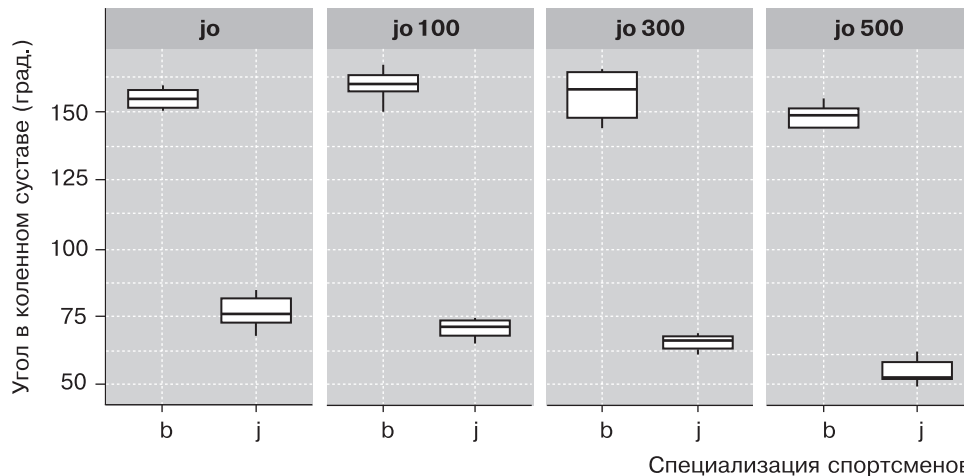


Рис. 3. Угол в коленном суставе в нижней точке траектории ОЦМТ в различных прыжках

Несмотря на очевидную разницу в организации движения прыжка в обеих группах, максимальная высота перемещения ОЦМТ вверх у спортсменов после спрыгивания с различных высот практически не отличается (для $jo100$: $h = -1,12090$; для $jo300$: $h = 1,3611$; для $jo500$: $h = 1,6012$) (рис. 1). Что касается достоверной разницы в высоте перемещения ОЦМТ в прыжках из исходного положения ($h = -2,562$), то ее можно объяснить разницей в исходных данных спортсменов. По общей массе тела бобслеисты на 26,6% превышают показатель прыгунов на лыжах с трамплина и на 33,3% – по индексу массы тела (табл. 1).

На рисунках 4 и 5 представлены данные плотности распределения вероятности времени начала разгиба-

ния суставов нижних конечностей относительно момента нахождения ОЦМТ в нижней точке траектории движения для всех видов выполненных прыжков.

Организация начала разгибания коленного сустава относительно тазобедренного сустава принципиально различается между группами. У бобслеистов начало разгибания суставов происходит с очень коротким промежутком времени, которое близко по времени к нижней точке траектории ОЦМТ. Начало разгибания в коленных суставах опережает момент нижней точки ОЦМТ. У прыгунов на лыжах с трамплина наблюдается высокая вероятность последовательного разгибания в суставах, начиная с тазобедренных. Разгибание начинается с момента максимального опускания ОЦМТ вниз.

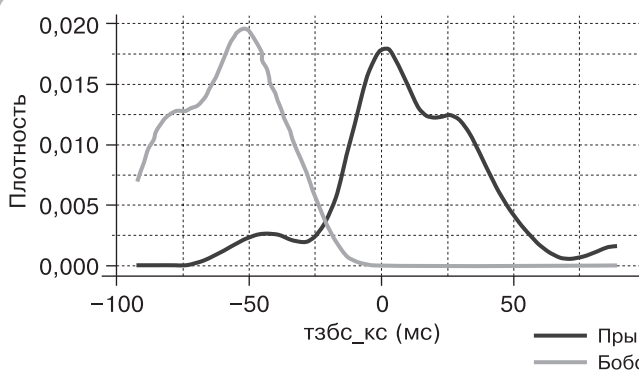


Рис. 4. Плотность распределения вероятности показателя разницы времени начала разгибания тазобедренных суставов (тзбс) относительно коленных (кс) в фазе отталкивания

Нижнее положение ОЦМТ на рисунках соответствует значению «0» на оси абсцисс.

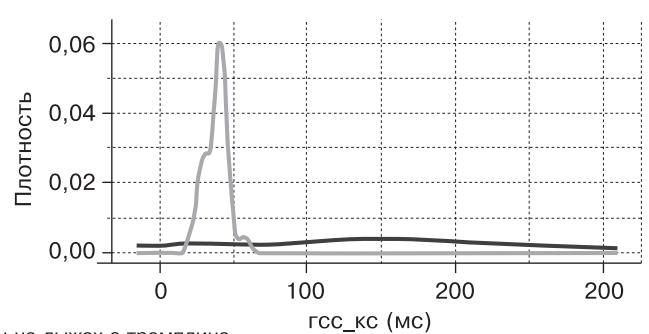


Рис. 5. Плотность распределения вероятности показателя разницы времени начала разгибания голеностопных суставов (гсс) относительно коленных (кс) в фазе отталкивания

Обсуждение результатов исследования

Традиционно при анализе спортивных движений используется биомеханический подход на основе оптимизации движения. Результатом такого анализа является возможность количественно оценить различные характеристики движения (кинематические, динамические, энергетические). В оптимальном управлении проводится решение прямой и обратной задач механики, в результате

чего приходят к ценным состояниям, т.е. минимизируют некоторую функцию затрат, задавая желаемое движение [6, 7]. Характеристики движения при прямой и обратной динамике являются внешними по отношению к системе управления движениями, в которых имеются внутренние или скрытые составляющие. Другими словами, биомеханический анализ изучает следствия, а не причины, их выз-



вавшие. Как говорилось во введении, прогностическое моделирование даёт теоретическое представление о связи внешних данных и внутренних моделей управления движениями на основе байесовского подхода. Байесовская гипотеза мозга опирается на байесовскую теорию вероятности для объяснения восприятия как процесса, основанного на внутренних или генеративных моделях. Суть этой гипотезы заключается в том, что мозг обладает моделью мира, которую он постоянно уточняет и оптимизирует на основе информации, поступающей от сенсорных систем. Теоретическое представление о скрытых механизмах управления движениями основывается на вероятностной сенсорной информации, получаемой при движении, и сравнении ее с предшествующим двигательным опытом.

Перед проведением анализа выполнения прыжка вверх с места с помощью прогностического кодирования следует дать краткое описание основного соревновательного упражнения в бобслее и прыжках на лыжах с трамплина. Такое описание можно считать представлением о двигательном опыте высококвалифицированных спортсменов, который они используют в качестве внутренней модели действий в различных условиях.

Бобслей. Высокая скорость разгона боба имеет решающее значение для высоких скоростей боба во время заезда, следовательно, меньшего общего времени прохождения трассы [8]. На стартовом этапе спортсмены должны максимально разогнать боб, пробегаая на полной скорости примерно 55 м в течение 6 с [9]. В фазах старта и разгона мышцы-разгибатели должны производить большую механическую мощность в суставах ног для создания значительной пропульсивной горизонтальной силы, двигающей тело спортсмена и боб вперед.

Прыжки на лыжах с трамплина. Отталкивание в прыжках на лыжах с трамплина является наиболее важной фазой, так как эта фаза влияет на условия начальной фазы полета [11]. Спортсмены начинают выполнять отталкивание из положения приседа, находясь в квазистатическом положении [12]. Такая поза необходима для сохранения эффективной аэродинамической позы. По данным Virnavirta M. с соавт., время от начала разгибания нижних конечностей и подъема ОЦМТ спортсмена находится в пределах 0,25–0,30 с [13]. Закрепленные колени спортсмена должны противодействовать дополнительной нагрузке, вызванной центробежной силой на изгибе трамплина. Быстрый подъем лыж после отталкивания не позволяет эффективно использовать мышцы голеностопных суставов, и поэтому отталкивание больше осуществляется мышцами-разгибателями колен.

Прыжок вверх с места. В вертикальных прыжках человека целевой функцией можно считать максимизацию высоты прыжка, достигаемой ОЦМТ [14]. В упрощенном виде двигательная конструкция спортсмена, выполняющего прыжок вверх с места, состоит из трех сочлененных рычагов (для каждой ноги) с двумя скрытыми состояниями и туловищем с головой. Скрытые состояния соответствуют определенному угловому положению трех суставов нижних конечностей. Текущее

положение ОЦМТ представляет собой сумму векторов, описывающих расположение каждого сустава. Начальными условиями для выполнения движения являются положение ОЦМТ и высота тумбы (при ее наличии) для прыгивания. Мозг воспринимает скрытые состояния непосредственно в терминах проприоцептивного входа, который сигнализирует об угловом положении суставов. С помощью зрительного ввода спортсмен определяет окружающую ситуацию вокруг себя и предполагаемое местоположение цели движения. Иерархия системы управления у спортсмена может быть представлена тремя уровнями: мотивации движения – кора головного мозга; управление позами – мозжечок; двигательных рефлексов – спинальный аппарат. Ошибки сенсорного предсказания передаются на более высокие уровни ЦНС для оптимизации условных ожиданий скрытых (углового положения суставов и временных параметров) и причинных (целевых) состояний. Последующие предсказания отправляются обратно, чтобы подавить сенсорные ошибки предсказания. В то же время ошибки сенсорного предсказания также пытаются подавить себя, изменяя сенсорный ввод посредством действия.

Ранее был представлен подробный биомеханический анализ выполнения прыжков вверх спортсменами различной спортивной специализации, включая бобслеистов и прыгунов на лыжах с трамплина [15]. В статье показано, что у бобслеистов и прыгунов на лыжах с трамплина мышечно-сухожильный аппарат нижних конечностей работает по-разному [15]. С точки зрения теоретического объяснения с помощью прогностического кодирования процесс управления движением выглядит следующим образом. Бобслеисты, используя в отталкивании механизм предварительного растяжения мышц (механизм катапульты), выполняют движение быстро (рис. 2), с малой амплитудой движения в суставах (рис. 3), что создает высокую жесткость в суставах нижних конечностей. Другим важным условием для данного механизма является сближение момента начала разгибания в суставах (рис. 4). Такие условия позволяют прогнозировать второму уровню иерархии (мозжечковому) опережающее включение в работу по разгибанию коленных суставов при движении ОЦМТ вниз. На рисунке 3 показано, что разгибание в коленных суставах бобслеистов опережает начало разгибания в тазобедренных суставах. Начало разгибания коленных суставов происходит до достижения нижней точки траектории ОЦМТ, что может говорить о наличии условного ожидания мозжечкового уровня управления относительно ниже лежащего рефлекторного для срабатывания стретч-рефлекса, приводящего в целом к усилению сокращения мышц и использованию предварительно растянутого ахиллового сухожилия. Условное ожидание верхнего уровня мотивации для бобслеистов относительно уровня управления позой определяет постоянство угловых (скрытых) показателей для всех видов выполнения прыжков после прыгивания (рис. 2), т.к. время для них не меняется. График на рис. 4, отражающий плотность распределения вероятности отмеченных фактов, характеризует низкую ошибку прогноза взаимодействия уровней мотивации и управления позой, как



и характеристика действия мышц голеностопных суставов относительно коленных (рис. 5). Биомеханический анализ прыжков показал, что мышцы голеностопных суставов играют ключевую роль в механизме катапульты у бобслеистов [15]. Постоянство угловых показателей может объяснить более высокий результат перемещения ОЦМТ прыгунов на лыжах с трамплина относительно бобслеистов в прыжках вверх из исходного положения. Бобслеисты не могут в этом виде прыжка создать достаточные условия для эффективного срабатывания стретч-рефлекса.

Время амортизации прыгунов на лыжах с трамплина далеко выходило за те пределы, где возможно использование стретч-рефлекса (рис. 2). Механизм передачи энергии через двусуставные мышцы может проявляться в том случае, если эти мышцы работают близко к изометрическому режиму [16]. Поскольку передача энергии не может происходить мгновенно, то этот процесс требует времени для натяжения и обретения жесткости двусуставных мышц [17]. У прыгунов на лыжах с трамплина ошибки сенсорного прогнозирования передаются от уровня рефлексов на уровень управления позами для оптимизации условных ожиданий углового положения суставов (скрытых состояний) в зависимости от ситуации выполнения прыжка. Ситуацию прогноза ошибки осуществляет верхний уровень иерархии посредством визуальной информации о начальном положении спортсмена. Посредством изменения углов в суставах уровень управления позами осуществляется варьированием мощности движения. Уровень рефлексов выполняет соответствующие моторные программы, ожидаемые уровнем управления позами. Понятно, что такая стратегия организации имеет преимущество в большем пути разгона ОЦМТ, что выражается в увеличении времени выполнения прыжка в соответствии с повышением высоты прыгивания (рис. 2). В соответствии со спецификой работы мышц голеностопных суставов время отталкивания в основном соревновательном упражнении не сильно изменится, поскольку нет необходимости объяснять ошибку прогноза. Это связано с тем, что априори спортсмен ожидает положение стопы относительно голени в случайном месте (рис. 5).

Из полученных данных может возникнуть соблазн в процессе обучения детей и подростков технике движений стремиться получить схожую внешнюю структуру движений с основным соревновательным. Однако это будет в корне неправильным в связи с: а) постепенным созреванием структур сенсория и когнитивных возрастных особенностей при обучении движениям; б) постепенным и длительным процессом настройки взаимодействия иерархических уровней управления. В таком случае необходимо воспитывать у юных спортсменов скрытые механизмы управления (т.е. ощущения),

приводящие к результатам, фиксируемым внешними наблюдателями. В последнем случае – накопление опыта восприятия нижележащего уровня при определенных требованиях вышележащего. В связи с естественными биологическими изменениями морфологических структур растущего организма взаимоотношения между уровнями иерархии постоянно изменяются как в локальном, так и общем системном смысле. Это в свою очередь объясняет неустойчивость, высокую вариативность выполнения детьми и подростками даже относительно простых тренировочных заданий. Тем не менее раннее начало занятий определенными видами спорта позволяет накапливать перцептивный опыт в соответствии с естественным развитием структур организма.

Понимание скрытых причин проявления количественных показателей спортивных движений на основе прогнозирующего кодирования позволяет конкретизировать положение Н.А. Бернштейна об уменьшении количества степеней свободы при управлении движением и использовании дополнительных преимуществ за счет реактивных сил. Принципиальным в уточнении является то, что у классика основополагающим является моторика, а функция сенсорики заключается в постоянной коррекции выполняемых движений. Внесение поправок в движение осуществляется на основе получаемых сигналов проприорецепторов. В прогностическом кодировании перцептивная информация на основе опыта является первичной и выстраивает вероятностные модели, которые должна реализовать моторная составляющая.

Заключение

В статье дано теоретическое объяснение различий в организации управления движениями для спортсменов разных спортивных специализаций по решению одной двигательной задачи с использованием теории прогностического кодирования. Показано, что спортсмены имеют разные внутренние модели окружающего мира, которые формировались под воздействием длительной тренировки.

Следствием теоретического осмысления эмпирических данных является новое знание о необходимости учета не только фиксированных традиционных количественных результатов тестовых процедур, но и учета способа их достижения у квалифицированных спортсменов с использованием вероятностных данных перцепции.

Обучение способам управления движением на основе информации сенсорной, а не моторной области, может объяснить возможность выполнять сложные движения с высокой стабильностью. Основным путем повышения эффективности методик спортивной подготовки видится в поиске и понимании (объяснении) закономерностей возрастной динамики изменения индивидуальных внутренних моделей.

*Работа выполнена в рамках государственного задания
ФГБУ ФНЦ ВНИИФК № 777-00026-22-00
(код темы № 001-22/4)*



Литература/References

1. Clark, A. (2013), What ever next? Predictive brains, situated agents and the future of cognitive science, *Behavioral and brain sciences*, 36 (3), pp. 181–204.
2. Friston, K.J. (2010), The free-energy principle: a unified brain theory? *Nature Reviews. Neuroscience*, vol. 11, pp. 127–138.
3. Seth, A.K. (2014), A predictive processing theory of sensorimotor contingencies: Explaining the puzzle of perceptual presence and its absence in synaesthesia, *Cognitive Neuroscience*, 5 (2), pp. 97–118.
4. Rao, R.P. and Ballard, D.H. (1999), Predictive coding in the visual cortex: A functional interpretation of some extra-classical receptive-field effects, *Nature Neuroscience*, 2 (1), pp. 79–87.
5. Hamner, S.R. and Delp, S.L. (2013), Muscle contributions to fore-aft and vertical body mass center accelerations over a range of running speeds, *J Biomech.*, 46 (4), pp. 780–787.
6. Pandy, M.G., Zajac, F.E., Sim, E. and Levine, W.S. (1990), An optimal control model for maximum-height human jumping, *J Biomech.*, 23, pp. 1185–1198.
7. Glitsch, U. and Baumann, W. (1997), The three-dimensional determination of internal loads in the lower extremity, *J Biomech.*, 30, pp. 1123–1131.
8. Park, S., Lee, K., Kim, D., Yoo, J., Jung, J. and Park, K. (2017), Biomechanical Analysis at the Start of Bobsleigh Run in Preparation for the 2018 Pyeongchang Winter Olympics, *Journal of Korean Society of Kinetics*, 27 (4), pp. 239–245.
9. Colyer, S.L., Stokes, K.A., Bilzon, J.L., Cardinale, M. and Salo, A.I. (2017), Physical Predictors of Elite Skeleton Start Performance, *Int J Sports Physiol Perform.*, 12, (1), pp. 81–89.
10. Goldmann, J.-P., Sanno, M., Heinrich, K., Grothe, S., Göll, F., Droszez, A., Stäudle, B., Albracht, K. and Braunstein, B. (2018), Joint specific mechanical power during the push phase of elite bobsleigh, In: *Proceedings of the 8th World Congress of Biomechanics*, vol. 8, [Online] URL: https://fis-db.dshs-koeln.de/ws/portalfiles/portal/3439996/Abstract_bobsleigh_Goldmann_WCB_2018.pdf
11. Schwameder, H. (2011), Challenges and issues in ski jumping biomechanics, In: Müller E., Lindinger, S. and Stöggl, T. (eds.), *Science and Skiing*, V. Oxford: Meyer & Meyer Sport, pp. 28–37.
12. Schwameder, H. and Müller, E. (1995), Biomechanische Beschreibung und Analyse der V-Technik im Skispringen, *Spectrum der Sportwissenschaften*, 7, pp. 1, 5–36.
13. Virnava, M., Perttunen, J. and Komi, P.V. (1999), Ski jumping take-off: Similarity of the plantar pressure and muscle activation patterns in three different size hills, *J Sport Sci*, 17, pp. 7, 535.
14. Anderson, F.C. and Pandy, M.G. (1999), A dynamic optimization solution for vertical jumping in three dimensions, *Comput. Methods Biomech. Biomed., Eng.* 2, pp. 201–231.
15. Shestakov, M. and Zubkova, A. (2021), Peculiarities of Muscle-Tendon Mechanics and Energetics in Elite Athletes in Various Sports, Taiar, R. (Ed.), *Contemporary Advances in Sports Science*, London, Intech Open, pp. 159–175, DOI: 10.5772/intechopen.93203
16. Bobbert, M.F. and van Soest, A.J. (2000), Two-joint muscles offer the solution, but what was the problem? *Motor control*, 4 (1), pp. 48–116.
17. Leeuwen, J.L. van and Spoor, C.W. (1992). On the role of biarticular muscles in human jumping, *J Biomechanics*, 25 (2), pp. 207–209.

