

УДК 612.821.1

ВОЗРАСТНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПРОСТЫХ ГРАФИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ, ЦИКЛИЧЕСКИ ВЫПОЛНЯЕМЫХ В МАКСИМАЛЬНОМ ТЕМПЕ.

СООБЩЕНИЕ I. УВЕЛИЧЕНИЕ ТЕМПА ДВИЖЕНИЙ СВЯЗАНО С УМЕНЬШЕНИЕМ ЧИСЛА СУБДВИЖЕНИЙ В ЦИКЛЕ

(С) 2010 г. А.В.Курганский*, М.Е.Курганская**

e-mail: akurg@yandex.ru

*Институт возрастной физиологии РАО, Москва

**Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва

Праворукие испытуемые четырех различных возрастных групп – дети 5-6, 8-9, 11-12 лет и взрослые – циклически выполняли простые графические движения различной координационной и серийной сложности в максимально возможном темпе правой и левой рукой при двух способах удержания пера: в пальцах руки и в кулаке. Период циклического движения уменьшался с возрастом и это уменьшение зависело от того, какой рукой (правой или левой) выполнялось движение, а также от способа удержания пера. Темп появления субдвижений лишь незначительно зависел от возраста, не различался в правой и левой руках, но зависел от вида движения и способа удержания пера. Связанное с возрастом увеличение максимального темпа выполнения графических движений практически полностью может быть объяснено сокращением числа субдвижений, за счет которых реализуется цикл движения. Полученные данные обсуждаются с точки зрения представлений о субдвижениях как об "элементарных единицах", из которых строятся графические движения.

Ключевые слова: графические движения, временная структура, субдвижения.

Исследование изменений характера управления графическими движениями по мере развития ребенка представляет значительный интерес как в теоретическом, так и в практическом отношениях. Хотя возрастные изменения характера графических движений исследовались в ряде работ [1-4], едва ли можно утверждать, что к настоящему времени сложилась общепринятое представление о механизмах, лежащих в основе управления такими движениями, и о возрастных закономерностях формирования этих механизмов. Такая ситуация, помимо объективной сложности проблемы и относительной немногочисленности экспериментальных исследований на эту тему, связана со следующими обстоятельствами. По большей части, исследовались либо лишь самые простые графические движения (движения вдоль отрезка прямой линии, окружности или эллипса [1, 5, 6]), либо, напротив, достаточно сложные движения (серия букв "О" [3]). Кроме того, в экспериментальных работах обычно использовался ограниченный набор временных и пространственных параметров движений, специфически связанный с выбранной экспериментальной парадигмой и используемой теоретической моделью. Таковы, например, время движения и скорость [7], тангенциальная скорость и кривизна траектории [1], время движения и требуемая пространственная точность [5]. Между тем, как нам представляется, для выявления возрастной специфики управления графическими движениями важно, как минимум, (1) систематически варьировать сложность графических движений, что поможет выяснить относительный вклад периферических и центральных механизмов управления движениями; (2) использовать достаточно широкий набор параметров движения, даже если он представляется эклектичным с теоретической точки зрения. В частности, важно учитывать, что движения состоят из последовательностей субдвижений, т.е. учитывать тонкую структуру движений, которая, возможно, является фундаментальным свойством управления движениями [8-10]. Тонкая структура особенно заметна при повышении требований к пространственной точности [5], при выполнении медленных

движений [9], в ходе восстановления двигательной функции у людей, перенесших инсульт [11], а также при сравнимых условиях в большей степени, чем у молодых взрослых, представлена у детей и пожилых людей [7].

Цель настоящей работы состояла в том, чтобы дополнить существующую картину возрастных особенностей управления графическими движениями, проанализировав пространственно-временную структуру определенного класса таких движений – движений различной серийной и координационной сложности, циклически выполняемых в максимально быстром темпе. Причем, особое внимание было уделено соотношению макроскопических (темпу движения и его амплитуде) и микроскопических (числу и длительности субдвижений) характеристик циклического движения. Для этого был проведен эксперимент, в котором испытуемые четырех возрастных групп выполняли циклически графические движения различной сложности. При этом варьировали характер вовлекаемых в движение кинематических степеней свободы руки.

В настоящем сообщении представлена и обсуждается только та часть полученных данных, которая относится к временным параметрам циклических движений: а именно, зависимость максимального темпа выполнения движений от возраста и соотношение между максимальным темпом и тонкой структурой движения.

МЕТОДИКА

Испытуемые. В эксперименте участвовали 37 практически здоровых праворуких испытуемых обоих полов, принадлежавших к четырем возрастным группам (Г1-Г4). Первую группу Г1 составляли 7 старших дошкольников 5-6 лет (ср. возраст 5.97 ± 0.18); во вторую группу Г2 входили 10 детей 8-9 лет (ср. возраст 8.82 ± 0.27); третья группа включала 10 детей 11-12 лет (ср. возраст 11.29 ± 0.16); наконец, в последнюю четвертую группу входили 10 взрослых испытуемых 18-40 лет (ср. возраст 24.4 ± 8.5).

Экспериментальная установка. Испытуемые выполняли движения удерживая в

руке электронное перо графического планшета "EasyPainter" (Genius, Тайвань), которое не оставляло видимого следа на поверхности планшета. Графический планшет имел рабочую область 127 x127 мм, пространственное разрешение 0.025 мм и соединялся с персональным компьютером при помощи последовательного порта. Регистрировались координаты (с частота оцифровки 100 Гц) кончика электронного пера (далее "пера"), присоединенного к планшету с помощью гибкого тонкого кабеля. Ход эксперимента контролировался с помощью компьютерной программы, разработанной одним из авторов настоящей работы.

Задачи. Испытуемые выполняли четыре вида графических движений (рис. 1, А) различной координационной и серийной сложности. Учитывая, что характер вовлекаемых степеней свободы руки зависит от ориентации отрезка [12], мы использовали два варианта простых движений: движение вдоль отрезка прямой: движение в сагиттальном (от себя – к себе) направлении (ЛС) и движение в трансверсальном (налево-направо) направлении (ЛТ). Движение вдоль окружности (ОК) предполагает координацию по амплитуде и фазе движений в сагиттальном и трансверсальном направлениях, и поэтому такое графическое движение можно рассматривать как одновременное (параллельное) выполнение ЛС и ЛТ, т.е. как движение более сложное в координационном отношении.

Движение вдоль сторон квадрата (КВ), ориентированного вдоль сагиттальной линии, представляет собой последовательность движений ЛС-ЛТ-ЛС-ЛТ. Поэтому это движение можно рассматривать как серийное движение, которое требует согласованного временного расписания вовлечения степеней свободы, необходимых для последовательного выполнения движение ЛС и ЛТ. Все четыре вида движений ЛС, ЛТ, ОК и КВ испытуемые выполняли циклически в максимально быстром темпе как правой, так и левой рукой. Кроме того, варьировался характер вовлекаемых при выполнении движения кинематических степеней свободы руки: испытуемых просили выполнять каждое из четырех движений в двух вариантах (рис. 1, Б): "грубом", при котором перо удерживалось

в кулаке, а движение осуществлялось за счет подвижности в плечевом и локтевом суставах, и "тонком", в котором перо удерживалось стандартным образом тремя пальцами. В последнем случае движение осуществлялось за счет подвижности кисти, лучезапястного сустава и, отчасти, локтевого сустава. При этом, испытуемых просили не отрывать локоть от поверхности стола, когда они выполняли движение, удерживая перо пальцами; это позволяло снизить вклад в движение подвижности в локтевом и плечевом суставах. При удержании пера в кулаке на подвижность остальных суставов (лучезапястный, локтевой и плечевой) руки не накладывалось никаких ограничений.

Структура эксперимента. Каждая задача выполнялась испытуемым в четырех вариантах, соответствующих всем возможным сочетаниям уровней трех факторов: руки, выполняющей движение (правой или левой), способа удержания пера (пальцами или в кулаке). Таким образом, каждый испытуемый за время эксперимента выполнил 16 циклических движений (4 задачи \times 2 руки \times 2 способа удержания пера).

Процедура эксперимента. Каждый участник эксперимента выполнял все 16 вариантов циклических движений (в течение 15 секунд каждое) в пределах одной экспериментальной сессии общей продолжительностью около 45 минут. Перед каждой пробой испытуемого инструктировали и показывали образец фигуры (на листе бумаги), которую следовало рисовать. Все четыре фигуры имели одинаковые линейные размеры – длины отрезков, диаметр окружности и длина стороны квадрата составляли 25 мм. Испытуемого просили циклически "рисовать" показанную фигуру ("такую, как на образце") в максимально быстром темпе, избегая ошибок и не исправляя их, если они уже допущены. Детям младших возрастных групп экспериментатор обычно показывал выполнение требуемого движения с помощью карандаша и бумаги. За инструктированием следовала краткая тренировка, в ходе которой экспериментатор убеждался в том, что испытуемый усвоил инструкцию и достиг максимальной скорости выполнения.

При этом ни в ходе тренировки, ни во время тестирования не накладывалось никаких ограничений на размах движений – испытуемый сам выбирал амплитуду, совместную с требованием максимальной скорости выполнения движения; таким образом, размеры фигур, показанных на листе бумаги, носили "рекомендательный характер".

В третьей и четвертой задачах направление движения вдоль контура фигуры испытуемый выбирал самостоятельно; при этом 60% испытуемых выбрали движение по часовой стрелке и 40% – против часовой стрелки.

Во время эксперимента испытуемые находились в комнате с нормальным освещением и сидели в комфортной позе за столом, высота которого соответствовала возрасту. Во всех четырех задачах испытуемый имел возможность выбрать удобное для себя положение планшета. Испытуемых просили не отрывать кончик пера от поверхности графического планшета в процессе выполнения движений (усилие не контролировалось). Между последовательными пробами делались короткие перерывы для отдыха.

Анализ данных. Из каждой индивидуальной записи движения исключался начальный ее сегмент длительностью в 1 с, который приблизительно соответствовал характерному времени выхода циклического движения на стационарный уровень. Исходные, непосредственно зарегистрированные с помощью графического планшета, последовательности значений координат – функции $x_{org}(t)$ и $y_{org}(t)$ – сглаживались с помощью низкочастотного фильтра Баттерворта второго порядка с верхней граничной частотой, равной 15 Гц. Компенсация фазовой задержки, вносимой фильтром, достигалась за счет двукратного применения процедуры фильтрации: один раз от начала последовательности к концу, а второй раз – в обратном направлении [13]. Для устранения дрейфа положения фигуры на плоскости сглаженные функции $x_s(t)$ и $y_s(t)$ аппроксимировались с помощью метода наименьших квадратов кубическими

полиномами, и полученные оценки дрейфа $x_d(t)$ и $y_d(t)$ вычитались из сглаженных функций $x_s(t)$ и $y_s(t)$. Используя сглаженные и очищенные от тренда зависимости координат от времени $x(t) = x_s(t) - x_d(t)$ и $y(t) = y_s(t) - y_d(t)$, для каждой индивидуальной записи определялся вектор $\vec{\lambda}$, вдоль которого движение имело наибольший размах. Для ЛТ и ЛС направление вектора $\vec{\lambda}$ определялось ориентацией пространственной траектории движения (линией регрессии), для ОК оно совпадало с направлением большей полуоси эллипса, а для КВ – с одной из его диагоналей. Для дальнейшего анализа временных параметров движения использовалась зависимость координаты рабочей точки вдоль направления λ : $z(t) = \lambda_x x(t) + \lambda_y y(t)$. Длительности последовательных циклов T_k в индивидуальной записи движения определялись как разности моментов времени пересечения нулевого значения функцией $z(t)$ в направлении от положительных величин к отрицательным. В качестве оценки периода циклического движения использовалось среднее значение индивидуальных периодов $T = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{k=N} T_k$. Для оценки частоты следования субдвижений использовалась гистограмма интервалов I_k между смежными локальными максимумами проекции вектора мгновенного ускорения на направление λ (рис. 1, В). Примеры таких гистограмм показаны на рис. 1, Г. В качестве меры характерного для всего движения межпикового интервала использовалась медиана распределения индивидуальных межпиковых интервалов I_k , которую в дальнейшем мы и будем называть межпиковым интервалом (МПИ).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предварительный анализ показал, что длительность цикла в случае выполнения движения вдоль сторон квадрата примерно в 4 раза превышает длительность циклов в остальных трех движениях ЛТ, ЛС и ОК. Так, для взрослых испытуемых (Г4) периоды циклов в ЛТ, ЛС и ОК составили 213, 218, 243 мс, а

четверть длительности периода в КВ – 244 мс, что практически точно совпадает с периодом ОК и лишь немногим (около 30 мс) больше, чем периоды ЛТ и ЛС. В последующем анализе участвуют полные периоды циклических движений ЛТ, ЛС и ОК и 1/4 длительности движения КВ, и каждая из этих величин обозначается буквой T .

Величины T и МПИ анализировались с помощью многомерного (multivariate) дисперсионного анализа, в котором в качестве межиндивидуального фактора была взята принадлежность к одной из четырех возрастных групп ("возраст": Г1, Г2, Г3 и Г4), а в качестве трех внутрииндивидуальных факторов – "фигура" (ЛТ, ЛС, ОК, КВ), "захват" (пальцы, кулак) и "рука" (правая, левая). Результаты этих анализов представлены в таблице, а усредненные по каждому пересечению факторов ("возраст" x "фигура" x "захват" x "рука") величины T (сплошные линии) и МПИ (пунктирные линии) показаны на рис. 2, А в виде зависимостей от возраста отдельно для каждого вида движения (ЛТ, ЛС, ОК и КВ) при каждом из четырех возможных сочетаний способа удержания пера и руки, выполняющей движения. Из рис. 2, А видно, что для всех четырех видов движений вне зависимости от характера захвата и руки, выполняющей движения, величина T существенно убывает с возрастом, и это подтверждается значимым влиянием фактора "возраст" (см. таблицу) на эту величину. В отличие от величины T , длительность МПИ в меньшей степени изменяется с возрастом, и влияние фактора "возраст" оказывается незначимым.

Заметное на рис. 2, А общее преимущество в скорости движения правой руки подтверждается значимым эффектом фактора "рука", при этом, как показывает наличие значимого взаимодействия факторов "рука" и "возраст", преимущество правой руки неодинаково в четырех возрастных группах и составляет в группах Г1-Г4, соответственно, 130, 168, 104 и 78 мс.

Взаимодействие факторов "рука" и "возраст" оказывается значимым и для МПИ, однако здесь оно имеет другой смысл: для двух младших возрастных групп Г1 и

Г2 МПИ в левой руке меньше, чем в правой (-13 и -26 мс), а для двух старших Г3 и Г4 – наоборот (4 и 28 мс).

На величины T и МПИ также значимо влияет способ удержания пера, что видно и из рис. 2, А. В среднем, удержанию пера в кулаке соответствуют меньшие значения T , чем это характерно для удержания пера пальцами (389 мс против 418 мс), и, напротив, большие значения МПИ (269 мс против 208 мс). Наличие значимого взаимодействия факторов "захват" и "возраст" для величины T показывает неслучайную тенденцию к уменьшению с возрастом преимущества в скорости движения при удержании пера в кулаке по-сравнению с захватом пальцами: разность $T_{\text{пальцы}} - T_{\text{кулак}}$ составляет в группах Г1-Г4, соответственно, 76, 16, 52 и -14 мс. Величина $\text{МПИ}_{\text{пальцы}} - \text{МПИ}_{\text{кулак}}$ не меняет знак, оставаясь все время отрицательной и равной приблизительно -60 мс. Значимость взаимодействия факторов "захват" и "рука" показывает, что движения, осуществляемые при двух различных способах удержания пера, латерализованы в неодинаковой степени. Поскольку тройное взаимодействие факторов "захват", "рука" и "возраст" не достигает уровня значимости, мы можем говорить о степени латеральных различий для всех испытуемых в целом. Различие между левой и правой рукой $T_{\text{левая}} - T_{\text{правая}}$ на 51 мс больше при удержании пера пальцами, чем при захвате его кулаком (145 мс против 94 мс). Взаимодействие факторов "захват" и "рука" значимо и для величины МПИ: разность $\text{МПИ}_{\text{левая}} - \text{МПИ}_{\text{правая}}$ составляет -11 мс при удержании пера пальцами и 7 мс при удержании в кулаке.

Значимое влияние фактора "фигура" на величину T отражает тот факт, что движение по окружности выполняется дольше всех остальных движений (391, 341, 484 и 399 мс для ЛТ, ЛС, ОК и КВ, соответственно). Характер выполняемого движения существенно влияет и на величину МПИ (252, 236, 273 и 191 мс для ЛТ, ЛС, ОК и КВ, соответственно). Взаимодействие "фигура" и "возраст" связано с существенно более медленным убыванием величины T для движения ЛС по-сравнению с тремя остальными движениями. Взаимодействие "фигура" и "захват"

показывает, что влияние фактора "захват" на величину T существенно различается для разных фигур: $T_{\text{пальцы}} - T_{\text{кулак}}$ для ЛТ и ОК составляют 67 и 68 мс, а для ЛС и КВ – -34 и 29 мс. Аналогичное взаимодействие значимо и для МПИ: $\text{МПИ}_{\text{пальцы}} - \text{МПИ}_{\text{кулак}}$ составляет -58 мс, -59 мс, -105 мс и -30 мс для ЛТ, ЛС, ОК и КВ, соответственно. Взаимодействие "фигура" и "рука" значимо как для T , так и для МПИ. В случае T значимость этого взаимодействия показывает, что преимущество правой руки в скорости зависит от характера выполняемого движения и составляет $T_{\text{левая}} - T_{\text{правая}}$ 142, 114, 161 и 64 мс для ЛТ, ЛС, ОК и КВ, соответственно. Латеральные различия в величине МПИ существенно меньше; величина $\text{МПИ}_{\text{левая}} - \text{МПИ}_{\text{правая}}$ составляет 26, -20, -5, -8 мс, соответственно, для ЛТ, ЛС, ОК и КВ, и, следовательно, меньшая длительность МПИ в правой руке по сравнению с левой наблюдалась только для движения ЛТ.

Одна из задач настоящей работы состояла в том, чтобы выяснить, влияют ли координационная (в случае ОК) и серийная (в случае КВ) сложность циклического движения на предельный темп его выполнения. С этой целью были проведены дополнительные статистические тесты, в которых мы ограничились анализом движений, выполненных правой рукой при удержании пера пальцами руки и в которых период каждого из сложных движений ОК и КВ сравнивался с периодом каждого из простых движений ЛТ и ЛС. Многомерный дисперсионный анализ с внутрииндивидуальным фактором "сложность" (сложное движение, простое движение) и межиндивидуальным фактором "возраст" (Г1-Г4) показал значимо большую длительность цикла для ОК ($F(1,33) = 5.383$, $p = 0.027$) и для КВ ($F(1,33) = 8.69$, $p = 0.006$) по сравнению с ЛТ. При этом взаимодействие факторов "сложность" и "возраст" оказалось незначимым ($p > 0.1$). При сравнении сложных движений с ЛС длительность цикла также оказалась значимо большей для ОК ($F(1,33) = 14.293$, $p = 0.001$) и для КВ ($F(1,33) = 77.781$, $p < 0.0005$). В этом случае значимыми оказались также и взаимодействие факторов "сложность" и "возраст" как для ОК ($F(3,33) = 4.112$, $p = 0.014$), так и для КВ ($F(3,33) = 19.4$, $p < 0.0005$).

Аналогичные сравнения, выполненные для величины МПИ показали отсутствие значимых различий между ОК и каждым из движений ЛТ и ЛС ($p > 0.145$), однако выявили высоко значимые различия в величине МПИ между КВ, с одной стороны, и ЛТ ($F(1,33) = 14.826, p = 0.001$) и ЛС ($F(1,33) = 31.254, p < 0.0005$) – с другой. Ни в одном из этих четырех сравнений взаимодействие факторов "фигура" и "возраст" не достигало уровня значимости ($p > 0.25$).

Качественный анализ движений ЛТ, ЛС, ОК и КВ показал, что те положения на пространственной траектории, где достигается локальный максимум мгновенного ускорения, не распределены равномерно вдоль траектории, а имеют тенденцию к образованию пространственных кластеров. Эта тенденция (ее подробный анализ будет дан в следующем сообщении) намечается у детей младшей возрастной группы, становится более заметной у детей 8-9 лет и отчетливо видна у детей 11-12 лет и взрослых. Усиливающуюся с возрастом тенденцию к пространственной кластеризации локальных пиков ускорения иллюстрирует рис. 2, В, на котором показаны типичные для каждой из четырех возрастных групп примеры траекторий циклического движения ОК. На этих траекториях те пространственные положения, где достигался локальный максимум мгновенного ускорения, отмечены кружками. Из рисунка видно, что для представителя младшей возрастной группы типично более или менее равномерное распределение положений пиков ускорения вдоль траектории, у ребенка из группы Г2 проявляется тенденция к кластеризации этих положений вокруг трех центров, а у 11-летнего ребенка и у взрослого испытуемого кластеризация положений пиков ускорения становится очевидной.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты настоящего исследования показывают, что с возрастом значительно увеличивается максимальный темп циклического выполнения графических движений. Этот результат согласуется с данными других исследований, полученными как при выполнении циклического варианта задачи

Фиттса [5], так и при выполнении дискретных движений к пространственной цели [7].

Сокращение с возрастом длительности цикла движения, как показывают результаты настоящего исследования, существенно зависит от характера движения и способа удержания пера: так, наибольшие возрастные изменения наблюдаются в ОК, а наименьшие – в ЛС, и длительность цикла движения, выполненного при удержании пера в пальцах, больше, чем при удержании пера кулаком. Эти данные находятся в согласии с обнаруженной в работе [12] зависимостью длительности цикла выполняемого в максимальном темпе циклического движения (линии разной ориентации и окружность) от его характера (ориентации в пространстве) и налагаемых биомеханических связей. При этом, такая зависимость проявляется не только в условиях максимального темпа выполнения движений, но отмечается также при выполняемом в свободном темпе копировании фигур (заглавных букв "N" и "Z") как взрослыми, так и детьми 10 лет [14], а также при выполнении взрослыми и детьми различных возрастных групп циклических движений в заданном темпе [4].

Следуя подходу авторов работы [12], можно предположить, что оба полученных в настоящей работе эффекта – зависимость длительности периода от характера движения (ЛТ, ЛС, ОК и КВ) и от способа удержания пера – связаны с числом задействованных в движении степеней свободы и характером их координации. Большое число вовлекаемых степеней свободы налагает и большие требования к их координации и, соответственно, предполагает более сложное управление. Действительно, по нашим наблюдениям при удержании пера в кулаке движение ЛС выполнялась многими испытуемых как преимущественно односуставное движение за счет подвижности в локтевом суставе, а при удержании в пальцах – в луче-запястном. Движению по окружности требовало координации локтевой и плечевой подвижности при захвате пера кулаком и координации степеней свободы пальцев, лучезапястного сустава, а также

ротационной подвижности локтя.

Во всех четырех возрастных группах наблюдается преимущество ведущей правой руки в скорости выполнения циклических движений, причем, как мы видели, выраженность этого преимущества зависит от характера движения, способа удержания пера и от их сочетания; в частности, оно заметно больше при захвате пера пальцами по сравнению с захватом пера кулаком. Наличие значимых взаимодействий между степенью латерализации, с одной стороны, и характером удержания пера и видом движения – с другой, не позволяют говорить о преимуществе правой руки в скорости выполнения циклических движений у правшей как об одномерной величине. Преимущество правой руки не определяется каким-либо одним морфологическим или функциональным фактором периферической (большая доля медленных волокон в мышцах ведущей руки [15]) или центральной природы (преимущество правого полушария в обработке проприоцептивной информации, а левого – в обработке зрительной [16]); скорее, за этим преимуществом стоит зависящий от возраста итоговый баланс латеральных различий, специфических для задействованных в движении управляемых (кинематические степени свободы, мышцы) и управляющих (кортикальные представительства) структур.

Для взрослых испытуемых характерно наличие одного субдвижения в пределах цикла выполняемых правой рукой движений ЛТ, ЛС и ОК. Этот результат находится в согласии с известными из литературы данными о том, что при отсутствии высоких требований к пространственной точности быстрые циклические движения рук у взрослых испытуемых имеют практически синусоидальный характер [6], что выражается, в частности, в линейном характере связи между мгновенными величинами ускорения и положения [17]. Кроме того, наличие одного субдвижения в цикле быстрых осцилляторных движений непосредственно подтверждается наличием всего двух импульсов силы в течение одного периода колебаний – один в сгибателе и один в разгибателе [18].

Поскольку величина МПИ, характеризующая средний темп возникновения субдвижений, лишь незначительно изменяется с возрастом, возрастные изменения максимальной скорости выполнения циклических движений – сокращение длительности цикла – практически полностью определяется уменьшением числа субдвижений в пределах одного цикла движения. Возникает вопрос, почему дети реализуют цикл движения за счет нескольких субдвижений, а не за счет одного субдвижения, как это делают взрослые испытуемые? Ответ на этот вопрос зависит от взгляда на природу субдвижений, относительно которой среди исследователей в настоящее время нет единого мнения.

В соответствии с одной из наиболее распространенных точек зрения субдвижения возникают автоматически всякий раз, когда сенсорные каналы обратной связи сигнализируют о недопустимо большом отклонении от запланированной траектории [8, 19]. В частности, при движении к пространственной цели за счет второго и последующих субдвижений происходит коррекция ошибки, допущенной при программировании самого первого субдвижения (primary submovement), которое рассматривается как баллистическое [20]. С этой точки зрения наблюдаемые возрастные изменения означают совершенствование механизма программирования движения, который постепенно заменяет менее эффективный, но более универсальный способ управления движением на основе использования сенсорной обратной связи. Именно к такому выводу приходят авторы работы [7] на основе анализа временных параметров быстрых движений к пространственной цели, выполняемых испытуемыми разных возрастных групп. Этот вывод подтверждается и тем, что у детей 5-7 лет удельный вес длительности первого субдвижения в длительности всего движения существенно меньше, чем у взрослых [5], а чувствительность к маскировке кинестетического сигнала обратной связи за счет вибрации – существенно больше [21].

Иная точка зрения состоит в том, что субдвижения представляют собой

естественные элементы, из которых формируется всякое более-менее сложное движение, которое, таким образом, представляет собой серию субдвижений [8,9,22]. При таком взгляде на природу субдвижений большее их число у детей естественно связать с незрелостью механизмов построения сложного движения из элементарных субдвижений. Такая точка зрения косвенно подтверждается тем, что по мере восстановления управляемости движений после инсульта происходит сокращение числа субдвижений [11]. Ряд исследователей полагают, что серийная структура быстрых циклических движений упрощается по мере взросления, поскольку дети начинают использовать упругость мышц и связок для поддержания циклического движения, фактически переходя от серии дискретных субдвижений к непрерывному движению, аналогичному движению груза на пружине (mass-spring model) [6, 14, 23, 24].

Субдвижения рассматриваются также как проявление дискретного импульсного характера управления движениями [8, 25]. В частности, с кибернетической точки зрения такой способ управления является эффективным средством борьбы с автоколебаниями, неизбежно возникающими в замкнутом контуре управления движениями при наличии в ней временной задержки [8]. Временная задержка складывается из времени нервномышечного преобразования, эфферентной и афферентной транспортных задержек, как сегментарных так и центральных. Известно, что она сокращается с возрастом [26, 27], что может облегчать использование взрослыми более высокоамплитудных субдвижений (соответственно, больших скоростей возрастания усилия) без нарушения устойчивости управления движением.

Обоснованный выбор между перечисленными подходами к природе субдвижений невозможно сделать, исходя из одной только временной структуры циклических движений, обсуждаемой в настоящем сообщении. Поэтому мы ограничимся тем, что выскажем лишь некоторые соображения.

Во-первых, отметим несоответствие полученных данных представлению

об исключительно коррекционной природе субдвижений – тенденция к пространственной кластеризации тех положений, в которых достигается максимум ускорения, намечающаяся у детей 8-9 лет и отчетливая присутствующая у детей 11-12 лет свидетельствует о закономерном характере возникновения субдвижений, в то время как коррекции ошибки по положению (или скорости) привели бы к равномерному распределению таких положений вдоль траектории движения.

Во-вторых, косвенным свидетельством в пользу самостоятельного функционального значения субдвижений, является то, что у взрослых испытуемых длительность дискретного движения, являющегося фрагментом серии движений вдоль сторон квадрата, и длительность полного цикла непрерывного движения (вдоль отрезка прямой или вдоль окружности) практически одинакова и определяется длительностью единичного субдвижения.

Наконец, отсутствие выраженной зависимости величины МПИ от возраста наводит на мысль о тесной связи темпа возникновения субдвижений с периферическими механизмами управления движениями, прежде всего с характерной длительностью развиваемого мышцами фазического усилия, которая, в отличие от величины развиваемого усилия, по-видимому, остается практически неизменной в широком возрастном диапазоне [28, 29]. Частота циклического движения определяется темпом возникновения фазического усилия в мышцах-антагонистах, а его амплитуда и вариативность – соответственно развиваемым угловым ускорением (отношением момента силы к моменту инерции) и вариативностью момента силы. Между тем известно, что с возрастом существенно увеличивается максимальное ускорение [5] и одновременно снижается вариативность развиваемого усилия [30]. Поэтому свойственная детям организация цикла движений ЛТ, ЛС, ОК и стороны квадрата в виде последовательности субдвижений, может оказаться, во-первых, способом достичь требуемой амплитуды циклического движения, а, во-вторых, способом снижения

вариативности запланированной пространственной траектории. Действительно, поскольку стандартное отклонение моторного шума приблизительно пропорционально развиваемому усилию [31], конечная ошибка по положению в случае серии одинаковых субдвижений окажется меньше, чем ошибка эквивалентного по амплитуде единичного субдвижения, которое может привести к перцептивно недопустимым искажениям желаемой траектории. С этой точки зрения тот факт, что более координационно или серийно сложным движениям (ОК и КВ) соответствует большее по сравнению с простыми движениями ЛТ и ЛС число субдвижений в цикле, также может оказаться проявлением стратегии центрального управления движениями, направленной на обеспечение необходимой пространственной точности.

Полученные в настоящей работе результаты указывают на то, что тонкая временная структура движений существенно меняется в ходе онтогенеза и, по-видимому, является определяющим фактором для предельного темпа циклического выполнения графических движений. Поэтому важно выяснить ее генез и понять, какую роль она играет в организации произвольных движений, дополнив тем самым сложившиеся представления [32] об основных возрастных закономерностях совершенствования механизмов управления произвольными движениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в настоящем исследовании результаты показывают, что определяющим фактором в увеличении с возрастом максимального темпа выполнения циклически выполняемых графических движений является сокращение числа субдвижений в пределах одного цикла. Анализ тонкой структуры цикла движения свидетельствует против представления о субдвижениях как результате сенсорных коррекций и в большей мере соответствует представлению о них как о структурных единицах движения. Наблюдаемое у старших дошкольников и младших школьников большее по

сравнению со взрослыми число субдвижений в цикле движения может оказаться эффективным средством компенсации высокой вариативности, свойственной как периферическим, так и центральным отделам двигательной системы. В частности, обнаруженная в настоящем исследовании сложная и специфическая для каждой возрастной группы зависимость выраженности латеральных различий в величине предельного темпа от характера и сложности координационной структуры движения, что выражаются в большем числе субдвижений в субдоминантной руке по сравнению с доминантной, может определяться специфическим для каждого возраста соотношением между уровнем моторного шума на двигательной периферии и степенью зрелости супраспинальных механизмов управления движениями левой и правой рук.

Proof

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Viviani P., Schneider R. A Developmental Study of the Relationship Between Geometry and Kinematics in drawing movements // *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 1991. V. 17. № 1. P. 198-218.
2. Giudice E.D., Grossi D., Angelini R., Crisanti A.F., Latte F., Fragassi N.A., Trojano L. Spatial cognition in children. I. Development of drawing-related (visuospatial and constructional) abilities in preschool and early school years // *Brain & Development*. 2000. V. 22. P. 362-367.
3. Безруких М.М. Психофизиологические основы трудностей обучения письму // *Физ. Человека*. 2005. Т. 31. № 5. с. 52-57
4. Bo J., Bastian A.J., Contreras-Vidal J.L., Kagerer F.A., Clark J.E. Continuous and Discontinuous Drawing: High Temporal Variability Exists Only in Discontinuous Circling in Young Children // *J. Mot. Behav.* 2008. V. 40. № 5. P. 391–399.
5. Bourgeois F., Hay L. Information processing and movement optimization during development: kinematics of cyclical pointing in 5- to 11-year-old children // *Journal of motor behavior*. 2003. V. 35. № 2. P. 183-195.
6. Smits-Engelsman B.C.M., Van Galen G.P., Duysens J. The breakdown of Fitts' law in rapid, reciprocal aiming movements // *Exp. Brain Res.* 2002. V.145. P. 222–230.
7. Yan J.H., Stelmach G.E., Thomas J.R., Thomas K.T. Developmental features of Rapid Aiming Arm Movements Across the Lifespan // *J. Mot. Behav.* 2000. V. 32. № 2. P. 121-140.
8. Doeringer J.A., Hogan N. Serial processing in human movement production // *Neural Networks*. 1998. V. 11. P. 1345–1356.
9. Doeringer J.A., Hogan N. Intermittency in preplanned elbow movements persists in the absence of visual feedback // *J. Neurophysiol.* 1998. V. 80. P. 1787–1799.
10. Gross J., Timmermann L., Kujala J., Dirks M., Schmitz F., Salmelin R., Schnitzler A. The neural basis of intermittent motor control in humans // *PNAS*. 2002. V. 99. № 4. P. 2299 –2302.

11. Rohrer B., Fasoli S., Krebs H.I., Hughes R., Volpe B., Frontera W.R., Stein J., Hogan N. Movement Smoothness Changes during Stroke Recovery // *The Journal of Neuroscience*. 2002. V. 22. № 18. P. 8297–8304.
12. Dounskaia N., Van Gemmert A.W.A., Stelmach G.E. Interjoint coordination during handwriting-like movements // *Exp. Brain Res*. 2000. V. 135. P. 127–140.
13. ХЭММИНГ Р.У. Цифровые фильтры. // М. "Советское радио". 1980.
14. Meulenbroek R.G.J., Vinter A., Desbiez D. Exploitation of elasticity in copying geometrical patterns: The role of age, movement amplitude, and limb-segment involvement // *Acta Psychologica*. 1998. V. 99. P. 329-345.
15. Adam A., De Luca C.J., Erim Z. Hand Dominance and Motor Unit Firing Behavior // *J. Neurophysiol*. 1998. V. 80. P.1373-1382.
16. Goble D.J., Brown S.H. Upper Limb Asymmetries in the Matching of Proprioceptive Versus Visual Targets // *J. Neurophysiol*. 2008. V. 99. P. 3063–3074.
17. Mottet D., Bootsma R.J. The dynamics of goal-directed rhythmical aiming // *Biol. Cybern*. 1999. V. 80. P. 235-245.
18. Heuer H., Schulna R. Phasing of muscle activity during rapid finger oscillations // *J. Mot. Behav*. 2002. V. 34. № 3. P. 277-289.
19. Бернштейн Н.А. Очерки по физиологии движений и физиологии активности // М.: Медицина. 1966.
20. Meyer D.E., Abrams R.A., Kornblum S., Wright C.E., Smith J.E. Optimality in human motor performance: ideal control of rapid aimed movements // *Psychol. Rev*. 1988. V. 95. P. 340–370.
21. Hay L., Redon C. The control of goal-directed movements in children: role of proprioceptive muscle afferents // *Human Movement Science*. 1997. V. 16. P. 433-451.
22. Hogan N., Sternad D. On rhythmic and discrete movements: reflections, definitions and implications for motor control // *Exp. Brain Res*. 2007. V. 181. P. 13–30.
23. Guiard Y. On Fitts' and Hooke's laws: simple harmonic movement in upper-limb

- cyclic aiming // *Acta Psychol.* 1993. V. 82. P. 139–159.
24. Guiard Y. Fitts' law in the discrete vs. cyclical paradigm // *Human Movement Science.* 1997. V. 16. P. 97-131.
25. Wessberg J., Kakuda N. Single motor unit activity in relation to pulsatile motor output in human finger movements // *Journal of Physiology.* 1999. V.517. № 1. P. 273-285.
26. Muller K., Homberg V. Development of speed of repetitive movements in children is determined by structural changes in corticospinal efferents // *Neuroscience Letters.* 1992. V.144. P. 57-60.
27. Heinen F., Fietzek U.M., Berweck S., Hufschmidt A. Deuschl G., Korinthenberg R. Fast Corticospinal System and Motor Performance in Children: Conduction Proceeds Skill // *Pediatric Neurology.* 1998. V. 19. № 3. P. 217-221.
28. Bäckman E., Henriksson K.G. Skeletal muscle characteristics in children 9-15 years old: force, relaxation rate and contraction time // *Clin. Physiol.* 1988. V. 8. № 5. P. 521-527.
29. Grosset J-F., Mora I., Lambertz D., Perot C. Age-Related Changes in Twitch Properties of Plantar Flexor Muscles in Prepubertal Children // *Pediatric Research.* 2005. V. 58. № 5. P. 966-970.
30. Smits-Engelsman B.C.M., Westenberg Y., Duysens J. Development of isometric force and force control in children // *Cognitive Brain Research.* 2003. V. 17. P. 68–74.
31. Hamilton A. F. de C., Jones K.E., Wolpert D.M. The scaling of motor noise with muscle strength and motor unit number in humans // *Exp. Brain Res.* 2004. V. 157. P. 417–430.
32. Безруких М.М. Возрастные особенности произвольной регуляции движений // в кн. Развитие мозга и формирование познавательной деятельности ребенка. ред. Д.А.Фарбер и М.М.Безруких. Москва-Воронеж. 2009.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Двигательные задачи и временные параметры движений.

А – траектории циклических движений: ЛТ, ЛС, ОК и КВ; Б – два способа удержания пера графического планшета: в пальцах (слева) и в кулаке (справа); В – пример зависимости мгновенного ускорения a_z вдоль направления наибольшего размаха циклического движения от времени t . Величина индивидуального межпикового интервала I_k соответствует промежутку времени между смежными локальными максимумами на кривой $a_z(t)$. Пояснения в тексте; Г – примеры гистограмм индивидуальных значений межпиковых интервалов для движения ОК для испытуемых четырех возрастных групп Г1-Г4 (сверху-вниз). Пояснения в тексте.

Рис. 2. Возрастные зависимости временных параметров циклически выполняемых графических движений.

А – Значения периода T (сплошные линии) и величины МПИ (пунктирные линии) в каждой из четырех возрастных групп Г1-Г4 для каждого из четырех сочетаний экспериментальных условий рука (П - правая, Л - левая) и способ удержания пера (П - пальцы, К - кулак). Значки в виде вертикальных штрихов, горизонтальных штрихов, кружков и квадратов соответствуют движениям ЛС, ЛТ, ОК и КВ; Б – Среднее значение числа субдвижений n в каждой из четырех возрастных групп Г1-Г4 для каждого из четырех сочетаний экспериментальных условий рука (П - правая, Л - левая) и способ удержания пера (П - пальцы, К - кулак). Значки в виде вертикальных штрихов, горизонтальных штрихов, кружков и квадратов соответствуют движениям ЛС, ЛТ, ОК и КВ; В – Примеры траекторий при циклическом рисовании оружности испытуемыми каждой из возрастных групп Г1-Г4 (слева-направо) с наложенными на них положениями, в которых достигается локальный максимум мгновенного ускорения. Пояснения в тексте.

Таблица. Результаты многомерного дисперсионного анализа значений периода (T) и величин межпиковых интервалов (МПИ). Пояснения даны в тексте.

эффект	степени свободы		T		МПИ	
	гипотеза	остатки	F	p	F	p
возраст	3	33	8.205	0	1.163	0.339
фигура	3	31	13.740	0	63.030	0
захват	1	33	8.374	0.007	106.802	0
рука	1	33	138.612	0	0.143	0.708
фигура x возраст	9	89	5.155	0	1.255	0.273
захват x возраст	3	33	2.962	0.046	1.945	0.142
рука x возраст	3	33	3.894	0.017	8.593	0
фигура x захват	3	31	13.820	0	13.065	0
фигура x рука	3	31	7.998	0	6.211	0.002
захват x рука	1	33	9.285	0.005	5.012	0.032
фигура x захват x возраст	9	89	1.222	0.292	3.434	0.001
фигура x рука x возраст	9	89	1.879	0.065	2.689	0.008
захват x рука x возраст	3	33	0.666	0.579	1.015	0.399
фигура x захват x рука	3	31	5.533	0.004	2.036	0.129
фигура x захват x рука x возраст	9	89	1.188	0.312	1.005	0.442

Примечание: статистически значимые эффекты ($p < 0.05$) отмечены жирным шрифтом

Age-related trends in spatio-temporal structure of simple graphic movements performed in a cyclic manner at a maximal tempo.

Part I. Tempo increase is accounted for by a reduction in the number of submovements in a movement cycle.

A.V.Kurgansky*, M.E.Kurgansky**

e-mail: akurg@yandex.ru

Institute of Developmental Physiology, Russian Academy of Education, Moscow

Institute for Higher Nervous Activity and Neurophysiology, Russian Academy of Science, Moscow

Right-handed human subjects of 4 different ages (5-6, 8-9, 11-12 y.o. and adult subjects) performed simple graphical movements in a cyclic manner at a maximal possible tempo. The movements differed with respect to their coordination and serial complexity and were performed by each hand while holding the stylus either by the fingers or fist. It was found that cycle duration decreased considerably from the age of 5 to adulthood and the amount of the age-related gain in the performance rate depended on which hand (right vs. left) and/or grip (fingers vs. fist) was used to perform a movement. The rate of successive submovements neither changed substantially with age nor showed any lateral asymmetry. However it did depend on the movement being performed and the grip being used. The results show that the age-related trend in the cyclic movements can almost entirely be accounted for by a reduction in the number of submovements in a cycle. The results are discussed in the view of the hypothesis that considers submovements to be the building blocks of a graphical movement.

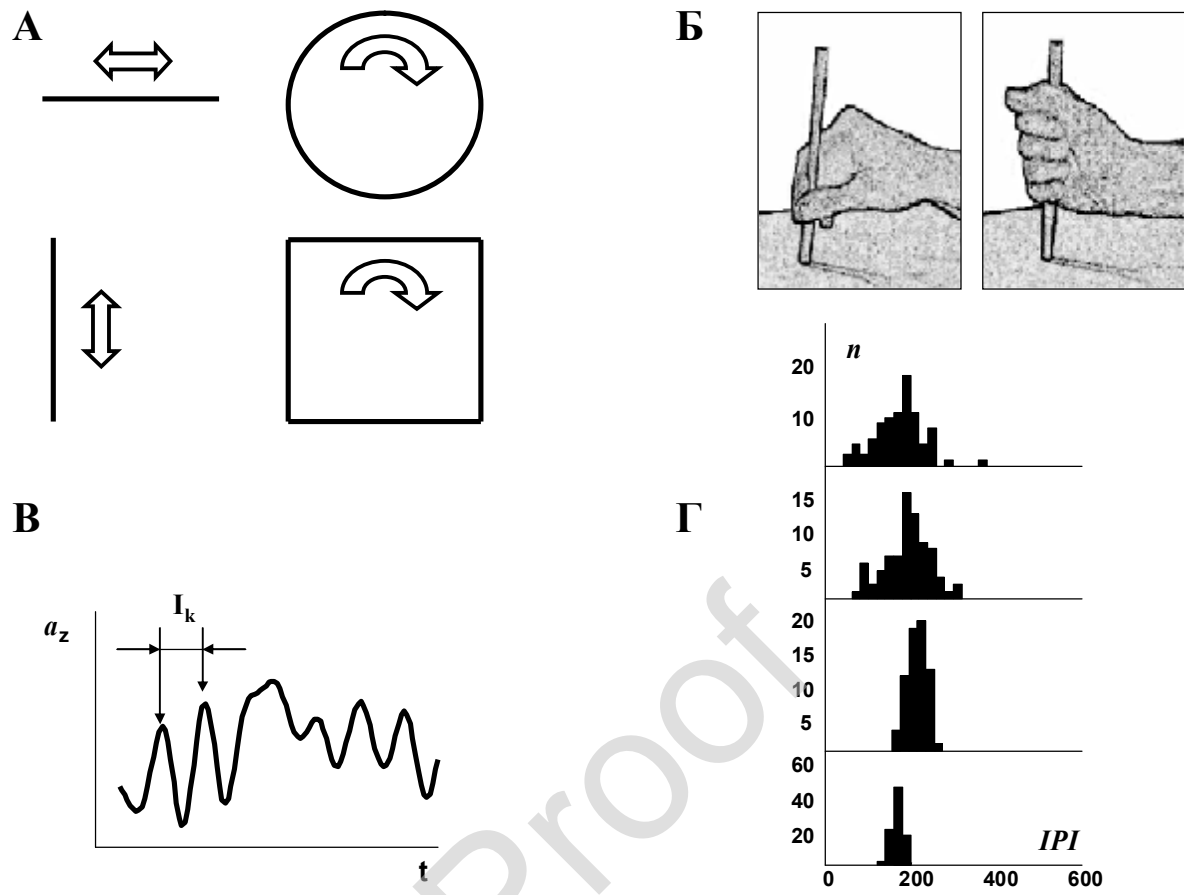


Рис.1.

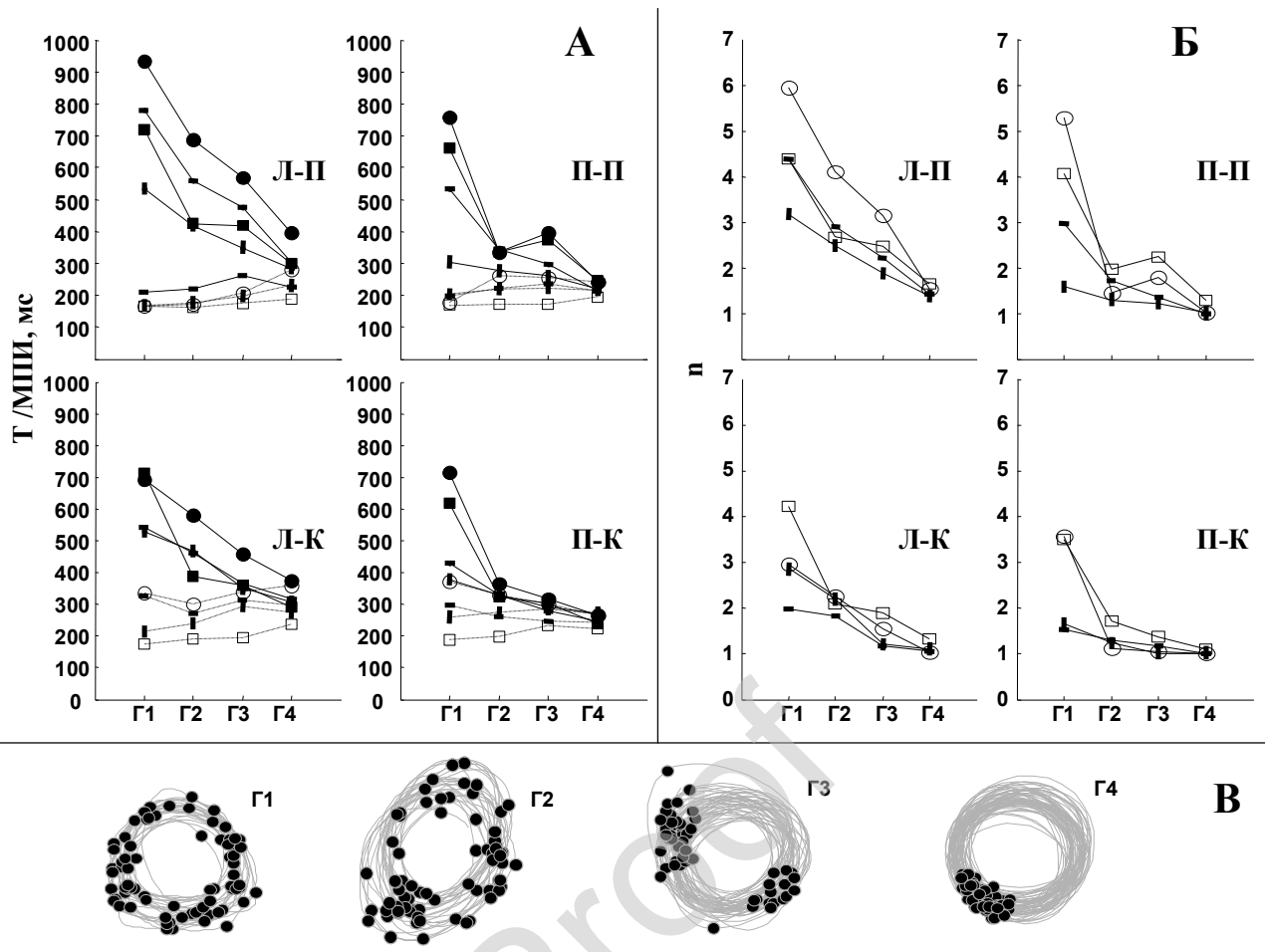


Рис. 2.