

Кришталь В.Н.<sup>1</sup>, Гончаров О.А.<sup>2</sup>, Синхронизация графических бимануальных движений с разной семантической нагрузкой

*Cryshstal V.N.<sup>1</sup>, Goncharov O.A.<sup>2</sup> Synchronization of graphic bimanual movements with different semantic load*

<sup>1</sup> Государственный университет «Дубна»

<sup>2</sup> Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации

Проводился анализ 4 видов графомоторных задач, выполненных бимануально, на предмет синхронизации движений двух рук. Графомоторные задачи были подобраны в соответствии с уровневой организацией двигательной активности по Н.А. Бернштейну: рисунок повторяющейся ломаной линии (уровень В), рисунок квадрата по представлению (уровень С2), рисунок дома (уровень D) и письмо слова «папа» печатными буквами (уровень Е). В исследовании приняли участие 15 студентов-правшей. Каждый из них сделал 64 рисунка, и всего было проанализировано 960 изображений. Рассогласование бимануальных движений анализировалось как разность фазовых кривых обеих рук. Статистическая обработка проводилась методом многофакторного дисперсионного анализа с повторными измерениями по факторам уровня построения движения и выполняющей движение руки. Выявлена прямая зависимость между семантической сложностью двигательной задачи и величинами рассогласования движения. Предлагаются два типа синхронизации бимануальных движений: бимануальное доминирование (полное и частичное) и бимануальная конкуренция. Первый тип синхронизации характерен для семантически простых задач, а второй распространен среди сложных.

**Ключевые слова:** уровни построения движения, бимануальная координация, межполушарная асимметрия и взаимодействие, графомоторная деятельность

## Введение в проблему

Согласование движений во времени является одним из основных аспектов построения целостного движения (наряду с его пространственной организацией). Применительно к бимануальным одностипным (т.е. имеющим одну и ту же цель и сопоставимые траектории) движениям проблема согласования движений во времени приобретает дополнительные оттенки: в некотором роде любые такие движения, помимо своей основной цели (будь то игра на музыкальном инструменте или стрельба из лука), имплицитно содержат в себе своеобразную задачу на слежение, а именно сопоставление и приведение к «эквивалентному» виду частотно-амплитудных, динамических (приложение усилия) и др. характеристик обеих рук. К слову, гитаристу требуется соотносить момент времени зажатия струн одной рукой и щипка второй как одной из операций извлечения звука, а лучнику – сопоставлять приложение необходимого сопротивления на рукоять лука при натягивании тетивы в ряду других операций для достижения цели. Такое положение дел открывает для исследователей своеобразный маркер трудности выполнения двигательных задач при исследовании бимануальных движений – величину рассогласования биомеханических характеристик движения. Другой вопрос (уже собственно психологический) – какие именно по содержанию задачи встают перед субъектом. Само по себе влияние смысла двигательной задачи на техническое исполнение движений известно достаточно давно, но данная сторона двигательной активности не изучена подробно, тем более когда речь заходит о бимануальной координации [Кришталь, 2020]. Мы предполагаем, что именно исследование бимануальных движений позволит нам лучше понять влияние семантической нагрузки на динамику выполнения моторных задач.

Современные представления о бимануальной координации сводятся к двум основным теоретическим подходам: модель обработки информации (the information-processing) и модель динамического шаблона (the dynamic pattern) [Krebs, 2022].

Традиционные модели обработки информации и регуляции движений описываются в рамках компьютерной метафоры, прибегая к понятиям центральных двигательных программ, содержащих в себе алгоритм операций, набор инструкций для осуществления двигательного акта, в том числе временные механизмы управления движением. Предлагаются своего рода внутренние часы, встроенный счетный механизм, возникающий и выключающийся вместе с самим движением и задающий ему ритм и темп [Wing, 1973].

Напротив, сторонники теории динамической системы (в частности, вдохновленные успехами

термодинамики) объясняли временную согласованность движений динамическими свойствами самой биологической (нейромоторной) системы. Биологические системы здесь рассматриваются в качестве ансамблей нелинейных осцилляторов с предельными циклами, а последовательность и регулирование движений являются следствием поведения этих систем [Kelso, 1981].

Собирая подходы к временной организации движения вместе, складывается впечатление, что разница двух описанных процессов заключается в динамической связи эффекторных и афферентных систем. Синхронизация как бы разворачивается либо по ходу движения, либо сразу заложена в виде программы. На наш взгляд, такое противопоставление не соответствует действительности. Подавляющее большинство движений человека регулируется по обратной связи, следовательно противоборствующей парой должна быть не просто центр-периферия двигательного акта, а различные сенсорные системы, его обслуживающие (например, мышечно-суставная или зрительная).

Изначально эти два подхода к регуляции движения во времени противопоставлялись друг другу, подразумевая, что существует один-единственный правильный вариант временной организации движений, а другие являются ложными. В настоящее время утверждается правомерность обоих направлений для разных типов задач и допускается наличие других временных регуляторов [Robertson, 1999; Zelaznik, 2000; 2002; 2005].

На примере изучения некоторых видов двигательной активности человека в целом и бимануальной координации в частности зарубежные авторы частично приближаются к пониманию управления моторикой человека, продвигаемому нами в этой работе – согласно которому управление зависит от репрезентации двигательной задачи субъектом.

В задачах с выраженной внешней пространственно-временной целью, будь то удар битой по летящему мячу или разовое рисование окружности, важным моментом является их завершающая фаза – попадание по движущейся цели или замыкание геометрической фигуры. Предметное содержание таких задач обращено на достигаемый результат, а временную форму управления таким движением называют «событийной синхронизацией» (event timing). В движениях, конечная цель которых эксплицитно не выражена, но само движение в силу своего относительно непрерывного, повторяющегося характера в некотором роде является самоцелью, как, например, в случае челночного бега, присутствует иная форма временной

организации движения – «текущая синхронизация» (emergent timing) [Zelaznik, 2005]. Словом, целью одних задач является конечный достигнутый результат, а целью других – сам процесс движения. В соответствии с этим, первый механизм можно назвать «результативной синхронизацией» (или «синхронизацией по результату»), а второй – «процессуальной синхронизацией» (или «синхронизацией по процессу»). В этих механизмах легко разглядываются наработки, добытые в рамках теорий информационных и динамических систем, рассмотренных выше.

Представленные выше механизмы временной организации движений распространяются также и на решение бимануальных задач. В основном направление подобных исследований свелось к сравнению и противопоставлению дискретных и непрерывных движений, то есть в одном случае – движений с явно выраженной (и намеренной) паузой между звеньями цепи движения или целыми движениями, а в другом случае – движений без эксплицитной паузы (цельное движение повторяется несколько раз без остановок). Разовое рисование окружности или серия рисунков окружностей с отчетливыми паузами между изображениями – это пример дискретного движения, а до определенной поры непрекращающееся рисование окружности (в результате напоминающее клубок ниток) – непрерывного. Были обнаружены некоторые свойства этих двух типов движений.

Так, проводились сравнения между дискретным и непрерывным бимануальным рисованием окружностей с целью обнаружения различий в их пространственных и временных характеристиках, а также различий в помехоустойчивости, затратах внимания [Summers, 2008]. Испытуемым было предложено задание: двумя руками одновременно обводить округлые шаблоны указательными пальцами с заданным ритмом. Ритм движения задавался мигающим светодиодом. Обводить шаблоны предлагалось двумя способами – с остановками и без них. Оба варианта выполнялись медленно (1000 мс или 1 Гц) и быстро (588 мс или 1,7 Гц), пауза длилась 400 мс (2,5 Гц).

Показано, что круговое дискретное движение по временным и пространственным компонентам обладает более сплоченной связью двух рук в сравнении с непрерывным повторением этой же траектории. Авторы объясняют такой результат наличием или отсутствием паузы. В случае бимануального дискретного движения пауза позволяет расцепить и снова соединить обще-разделяемую задачу для двух рук; в бимануальном непрерывном движении такой возможности нет [Summers, 2008; Ivry, 2004].

Они верно подметили, что хотя одно движение можно описать как непрерывное (continuous), а второе – как прекращающееся (discontinuous), в то же самое время оба движения можно еще и обозначить как ритмичные [Summers, 2008]. Действительно, оба рассмотренных движения исполняются по визуально заданному ритму – то есть он обращен к визуальной сенсорной системе (а не, скажем, аудиальной или кинестетической) – но и окружности в обоих случаях обводятся по шаблону. Можно (и следует) добавить, что оба движения являются еще и «обводящими», на что авторы, по всей видимости, не обратили своего внимания. Проблему они видят в недостаточно проработанной терминологии при описании движений и составленных для них определений, что, конечно, так, однако основная проблема заключается в отсутствии теории, способной разложить весь континуум движений по адекватным критериям.

Другой интересной находкой является тот факт, что при отвлечении испытуемых от основного задания на второстепенное в виде словесного ответа на звуковой стимул, о котором испытуемый предупрежден, но который появляется для него случайным образом, временной интервал между этим стимулом и ответом на него выше при выполнении дискретных движений [Summers, 2008]. Предполагается, что для дискретных движений повышается роль внимания, сознательного контроля за решением двигательной задачи. В свою очередь, непрерывные движения в большей степени регулируются автоматизированным контролем, менее ресурсно-затратным, а потому и второстепенные задачи оказывают меньшее интерферирующее воздействие [Lewis, 2003]. Продолжая эту намечающуюся линию зависимости сознательности контроля при решении моторных задач, можно предположить, что чем более содержательные, наполненные смыслом задачи, требуется решать человеку, тем более сильное подавляющее воздействие будут оказывать случайные стимулы, не имеющие отношения к основной деятельности в текущий момент.

В связи с назревающими трудностями при описании и категоризации тех или иных движений уместно обратиться к теории построения движений. В отечественной науке Н.А. Бернштейн заложил прочный фундамент концепции построения и координации разноуровневых движений и действий, временная слаженность и содержательная организация которых осуществляется разными сочетаниями морфо-функциональных мозговых структур [Бернштейн, 1947].

За рубежом Н.А. Бернштейн признан «отцом» современной науки об управлении движением [Talis, 2020]. «Его (*Бернштейна – прим. авт.*) влияние на развитие современной физиологии движений в мире значительно» и «хорошо известно» [Иоффе, 2003, с. 10-12]. В частности, концепция об уровне организации движений, предложенной Н.А. Бернштейном, применяется при создании роботов как эксплицитно, то есть со ссылками на его труды [Manoonpong, 2007], так и имплицитно, с использованием иерархических моделей с высокоуровневым планированием задач и низкоуровневым управлением движением [Нюо, 2022] (ср. со смысловой и технической сторонами двигательной задачи).

Мы собираемся применить (и проверить) эту концепцию в свете временных соотношений движений двух рук. По мере усложнения афферентационного синтеза время выступает на каждом уровне движения в разном качестве. «В уровне синергий оно всего яснее проступает как ритм (т.е. как временной узор); в уровне пространственного поля – как момент (например, при прицеливании), синхронность, длительность, скорость. В уровне действий оно выступает как смысловая или причинная последовательность; как связь сукцессивных элементов цепи, из которых слагается действие» [Бернштейн, 1947, с. 125]. В каждом конкретном движении мы встретим различный состав его временной разверстки: в зависимости от репрезентации задачи будет оформляться та или иная внутренняя связь и согласованность времен разных уровней. Памятуя о понятии ведущего уровня движения, мы в том числе подразумеваем и главенствующую роль той или иной временной организации движения над нижестоящими аналогичными структурами.

Согласно принципу единства координации и локализации, выдвинутому Н.А. Бернштейном, для двух форм временного регулирования классов движений должны иметь место разные морфо-функциональные структуры [Бернштейн, 1966]. Понятно, что конечные формы временной организации произвольных движений находят свое представительство в корковом субстрате, а локализация фоновых компонент согласования движения по времени располагается в нижележащих образованиях. Описанные выше механизмы результативной и процессуальной синхронизации скорее следует отнести к низовым формам регуляции движений во времени. Так, больные с поражениями мозжечка демонстрируют избирательные нарушения в синхронизации однократных, точных движений, то есть у них нарушается синхронизация движения по результату [Kennerley, 2002]. При болезни Паркинсона характер двигательной активности обнаруживает трудности с намеренным выполнением ритмических штампообразных операций, например, с продолжающимся рисунком окружности [Spencer,

2005]. Это подталкивает к мысли, что за временную организацию движения по ходу процесса отвечают субкортикальные структуры, в частности, базальные ганглии.

Стоит обратить внимание на обстоятельство, касающееся взаимодействия двух временных механизмов: синхронизация «по результату» может быть иницирующей, запускающей механизм контроля движения «по процессу». Если это так, то в соответствии с положением о ведущей афферентации в теории построения движений такая инициация может происходить именно «сверху вниз», то есть процессуальная синхронизация не может быть отправной точкой для синхронизации результативной. Сказанное не означает, что после синхронизации по процессу не может следовать синхронизация по результату, оно лишь раскрывает иерархическое взаимодействие систем при наличии высшего смысла задачи в текущий момент.

Нетрудно заметить, что как по характеристическим описательным свойствам движений, так и по предполагаемой локализации, согласование движения во времени по ходу самого процесса принадлежит уровню синергий и штампов В, а синхронизация с вынесенным вовне целевым характером – пространственному полю С, согласно уровневой организации движений по Н.А. Бернштейну [Бернштейн, 1947]. Данная концепция, однако, не ограничивается двумя уровнями построения движений, но представляет собой целых пять иерархически выстроенных уровней со свойственной им ведущей афферентацией и локализацией. Изучение синхронизационных возможностей каждого из этих «этажей» представляет интерес как для фундаментального знания, так и для прикладных областей. Проблему «несбалансированности» исследовательского поля отмечали и прежде, критикуя перевес работ в сторону задач с циклическими движениями против изучения объекто-ориентированных (object-oriented) и целенаправленных<sup>1</sup> (goal-directed) заданий [Obhi, 2004]. Эта «ограниченность» исследовательского поля и послужила нам стимулом для организации и проведения нашего исследования. Продолжая расширять область исследований бимануальной координации, до сих пор в основном очерченной движениями ритмического и теперь переместительного характера, мы планируем дополнить ее содержательным разнообразием предметной и символической деятельности человека.

---

<sup>1</sup> Понятно, что любое движение и действие подразумевает некую объективную цель, оно целесообразно. Здесь речь идет о явных, ясных, внешне-наблюдаемых целях, о достижении «ощутимого результата».

## Цель, задачи и гипотезы исследования

Цель нашего исследования – показать влияние семантического содержания на временные (фазовые) характеристики координации бимануальных сонаправленных движений.

Вопрос о синхронизации бимануальных движений именно в отношении предметного содержания выполняемых задач и подбираемых в соответствии с их семантикой регулирующих образов движений ставится впервые (во всяком случае, нам неизвестны планы подобных исследований), а потому наше исследование носит по большей части поисковый характер. В общих чертах мы исходим из предположения, что временная согласованность движений зависит от различий в сочетаниях обслуживаемых мозговых структур и от образовавшегося под каждую задачу своего сенсорного синтеза. В теоретическом варианте гипотезы мы предполагаем, что на согласованность бимануальных движений во времени влияет семантическое содержание задачи в таком отношении, что чем более сложной задача представляется в смысловом плане, тем более сильным будет рассогласование движений рук при выполнении этой задачи. В экспериментальном варианте нашей гипотезы мы полагаем, что при попарном сравнении синхронизации бимануальных движений графически схожих, но в одном случае опосредованных предметным и символическим содержанием, а в другом – ритмическим или пространственным, временная слаженность будет выше для движений с более простой афферентацией.

Для изучения кинематических характеристик бимануальной синхронизации графомоторных движений мы применили *метод цифрового анализа механограмм*, процедура которого будет описана ниже. С его помощью мы планируем выполнить следующие задачи:

- 1) сравнить фазовый сдвиг графических бимануальных движений, направленных на решение содержательно простых задач, с движениями, имеющими более сложную семантическую нагрузку;
- 2) сравнить отставание по фазе одной руки от другой в ситуации бимануального управления при решении содержательно отличных друг от друга заданий;
- 3) сравнить в долях от общего времени участки, на которых лидировала правая рука, в зависимости от смысла решаемой двигательной задачи.

## Выборка, экспериментальный стенд и стимульный материал

Исследование проводилось с 15 студентами-правшами (средний возраст 20,8 лет; 13 девушек, 2 юноши). Под правшами мы подразумеваем испытуемых с выраженным правым профилем



функциональной асимметрии. Профиль латеральной асимметрии определялся моторными и метрическими тестами для рук, глаз и ног [Вассерман, 1997; Хомская, 1995]. Участники на момент проведения эксперимента не владели приемами академического рисунка и не увлекались рисованием, обладали нормальным или скорректированным до нормального зрением и не имели выраженных проблем с моторикой. Испытуемые участвовали в исследовании добровольно.

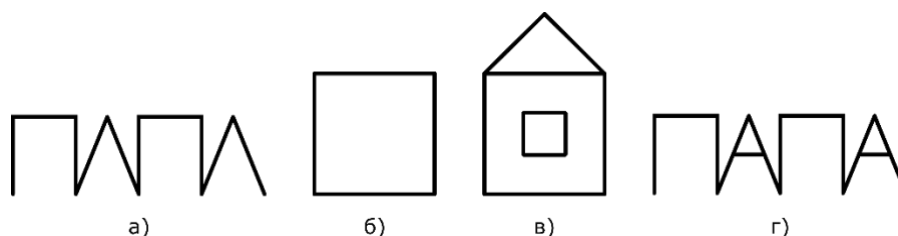
Экспериментальный стенд выглядел довольно просто. На столе располагались два одинаковых графических планшета (Wacom Intuos 3 A3), каждый из которых был подключен к своему ноутбуку (разрешение экрана 1280 × 768, диагональ 15.6"). Планшеты были приставлены боковыми гранями друг к другу так, что линия соприкосновения проходила вдоль сагиттальной плоскости тела испытуемого. На планшеты крепились специально разлинованная бумага под каждый тип задания, а наконечник стилуса заменялся на грифель, чтобы испытуемый мог видеть, что он рисует или пишет. Бумага разлиновывалась на 8 строчек (для заданий В и Е) или на 4 прямоугольных поля (для заданий С2 и D).

Графомоторные задания составлялись в соответствии с теорией построения движений Н.А. Бернштейна. Поскольку рисунок и письмо являются высшими видами двигательной активности (ведущими уровнями которых являются уровни D и E соответственно), задачи подбирались таким образом, чтобы фоновая их организация протекала на разных нижележащих структурах (уровней В, С и D). Испытуемым были предложены следующие задачи: графомоторная проба (В), рисование квадрата по представлению (С2), рисование простого домика (D) и написание слова «папа» печатными буквами (Е)<sup>2</sup>. Графомоторная проба относится к задаче уровня В, поскольку представляет собой двигательный стереотип (повторяющуюся геометрическую фигуру) без явного предметного содержания. Рисунок квадрата относится к задаче уровня С2, поскольку является разовым (ациклическим)

---

<sup>2</sup> Соответствие между «приписыванием» решению задания того или иного уровня и реальным решением этого задания на предполагаемом уровне испытуемым обосновывается тем, что Н.А. Бернштейн назвал «принципом равной простоты» [Бернштейн, 1967]. Принцип заключается в том, что задаче подбирается (сознательно или бессознательно) наиболее адекватное, то есть «экономное» по энергетическим затратам при сохранении необходимой «точности» результата, решение (движение). Это правило применимо к задачам с «готовыми» решениями, то есть оно не относится к задачам, первая фаза которых состоит как раз в определении самой задачи. В этом отношении испытуемым предложены простые и ясные задания, не требующие «перешифровок» с целью облегчения их выполнения и, тем более, понимания. Принадлежность к разным классам (контингентам) «провоцируемых» предложенными заданиями движений подтверждается клинической (нейропсихологической) практикой (фактами выпадения одних движений при интактности других) [Бернштейн, 1947; Лурия, 2018].

изображением фигуры, для которой существенно соблюдение ее пространственной метрики. Рисунок дома относится к задаче уровня D, так как целью здесь является не просто изображение некой геометрической фигуры с характерными ей свойствами, а изображение вещи с ее известными функциональными (предметными) свойствами – значением. Письмо является задачей уровня E, так как для ее понимания и решения требуется знаковая система, а не просто совокупность представлений о функциональном (предметном) содержании объекта или явления. На рис. 1 представлено примерное графическое отображение каждой двигательной задачи. Рисунки подбирались так, чтобы в своей линейно-конструктивной основе они являлись рядоположными (снизив тем самым возможное влияние «технической сложности» рисунка на координационные возможности испытуемых) [Назаров, 2020; Fitts, 1954].



**Рис. 1.** Примеры графомоторных заданий на каждый уровень построения движения.

Каждая проба выполнялась из исходного положения стоя, руки по бокам, по звуковому сигналу, обеими руками одновременно. Задачи предъявлялись испытуемым в квазислучайном порядке для исключения возможного влияния порядка выполнения проб. Перед каждым заданием испытуемый слышал короткие инструкции: для задания В – заполнить всю строку линией как на образце (рис. 1а); для задания С2 – нарисовать квадрат в каждом поле (рис. 1б), начиная с верхнего левого угла; для задания D – нарисовать домик в каждом поле (рис. 1в); и, наконец, для задания E – написать в каждой строчке слово «папа» печатными буквами (рис. 1г). В качестве временного образца предъявлялся только орнамент (рис. 1а). Испытуемым запрещалось выходить за очерченные линии поля или строки либо обводить их (указывалось это только в случае, если испытуемый прибегал к подобным приемам). Каждый испытуемый сделал 64 бимануальных рисунка (т.е. 32 на каждую руку), а всего было проанализировано 960 рисунков.

## Метод, алгоритмы обработки данных и статистический анализ

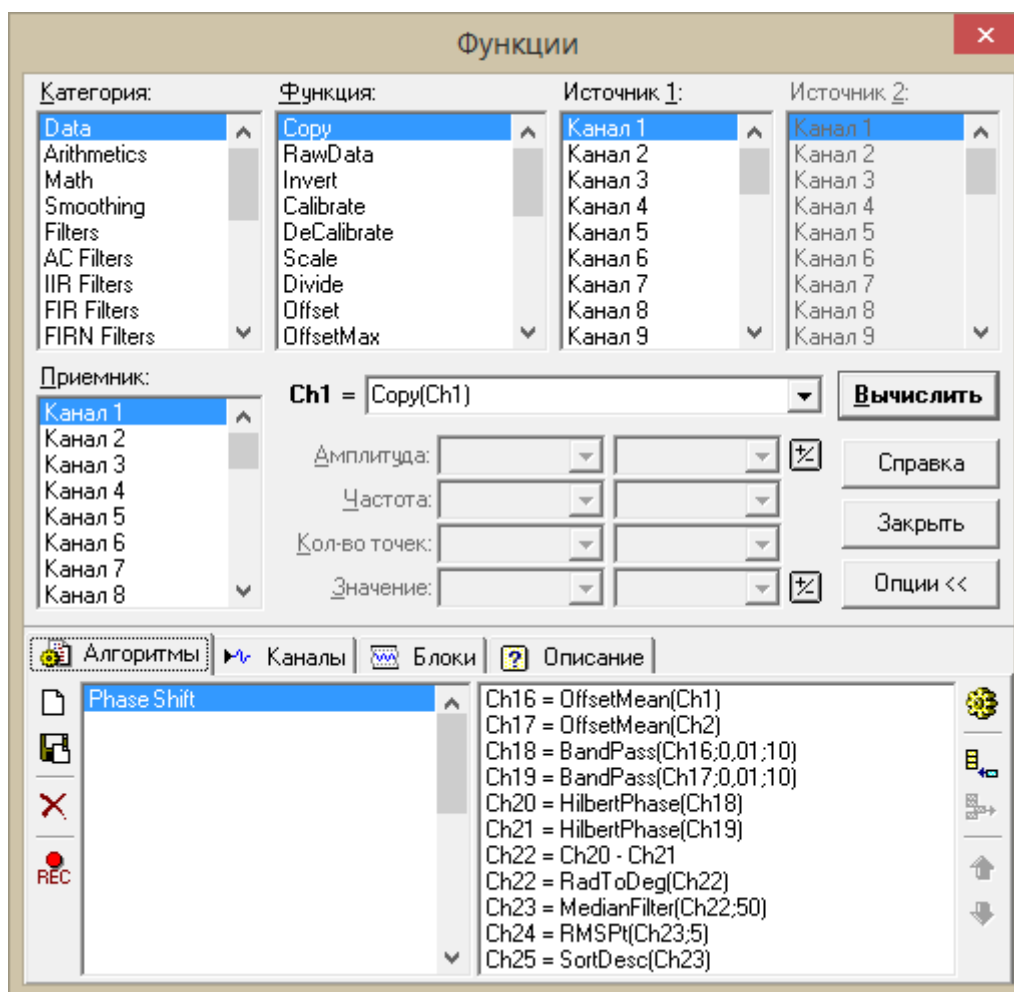
Для изучения бимануальной координации графических движений, как мы уже сказали, был применен метод цифрового анализа механограмм. При помощи системного драйвера «Cursor-XY» программного обеспечения «PowerGraph 3.3 Professional» регистрировались (с частотой

100 Гц) позиционные координаты рабочей точки (стилуса) и вычислялась скорость ее перемещения как евклидово расстояние производных обеих кривых перемещения. Поскольку продолжительность выполнения разных заданий разными испытуемыми значительно варьировалась от пробы к пробе, для уравнивания всех записей по времени и другим возможным неучтенным факторам они были сокращены до ~4 секунд; в эпоху анализа входил начальный фрагмент или иногда полная запись (в случае движений пространственного поля) исполнительной части движения.

Величина синхронизации бимануальных движений оценивалась как разность фазовых кривых левой и правой рук. Этот метод вычислений осуществляется путем перевода кривых скоростей обеих рук в фазовые кривые. Выделение фазы осуществляется преобразованием Гильберта<sup>3</sup>. Разность получившихся фазовых кривых обеих рук и будет мерой оценки синхронизации движений. Она анализировалась в двух вариантах – полном и относительном. Полная синхронизация – средний (квадратический) сдвиг фазы эпохи анализа – выражает общее рассогласование движения во времени (малиновая кривая, рис. 3). Относительная синхронизация – средний сдвиг фазы, рассчитанный по фрагменту эпохи для обеих рук в отдельности – позволяет оценить вклад каждой руки в процесс согласования движения во времени (серая кривая, рис. 3) и отвечает на вопрос: «В какой мере одна рука опережает другую (или, что то же самое, в какой мере вторая рука отстает от другой) по фазе?». Единица измерения – радианы (или угловые градусы).

---

<sup>3</sup> Суть преобразования Гильберта заключается в формировании комплексного *аналитического сигнала*, состоящего из исходного сигнала (вещественная часть) и *сопряженного сигнала* (мнимая часть). Сопряженный сигнал вычисляется путем смещения всех частот исходного сигнала на  $90^\circ$  (идеальный *фазовращатель*). Полученный в результате преобразования Гильберта комплексный аналитический сигнал позволяет вычислить *амплитудную огибающую* и *полную фазу* исходного сигнала (см. справочник PowerGraph или литературу по ЦОС).



**Рис. 2.** Алгоритм цифровой обработки данных для нахождения разности фазовых кривых бимануального движения (графический интерфейс вкладки – функция ПО PowerGraph 3.3).

На рис. 2 представлена последовательность операций обработки данных сверху вниз (правое нижнее окно). Каналы данных («ChN») выбираются произвольно, в первые два канала помещены годографы левой и правой рук, а в скобках после номера канала указывается количество точек сигнала (размер окна) там, где это требуется по формуле. Примеры графиков промежуточных и финальных расчетных данных можно увидеть на рис. 3 и рис. 7 (приведены с сокращениями).

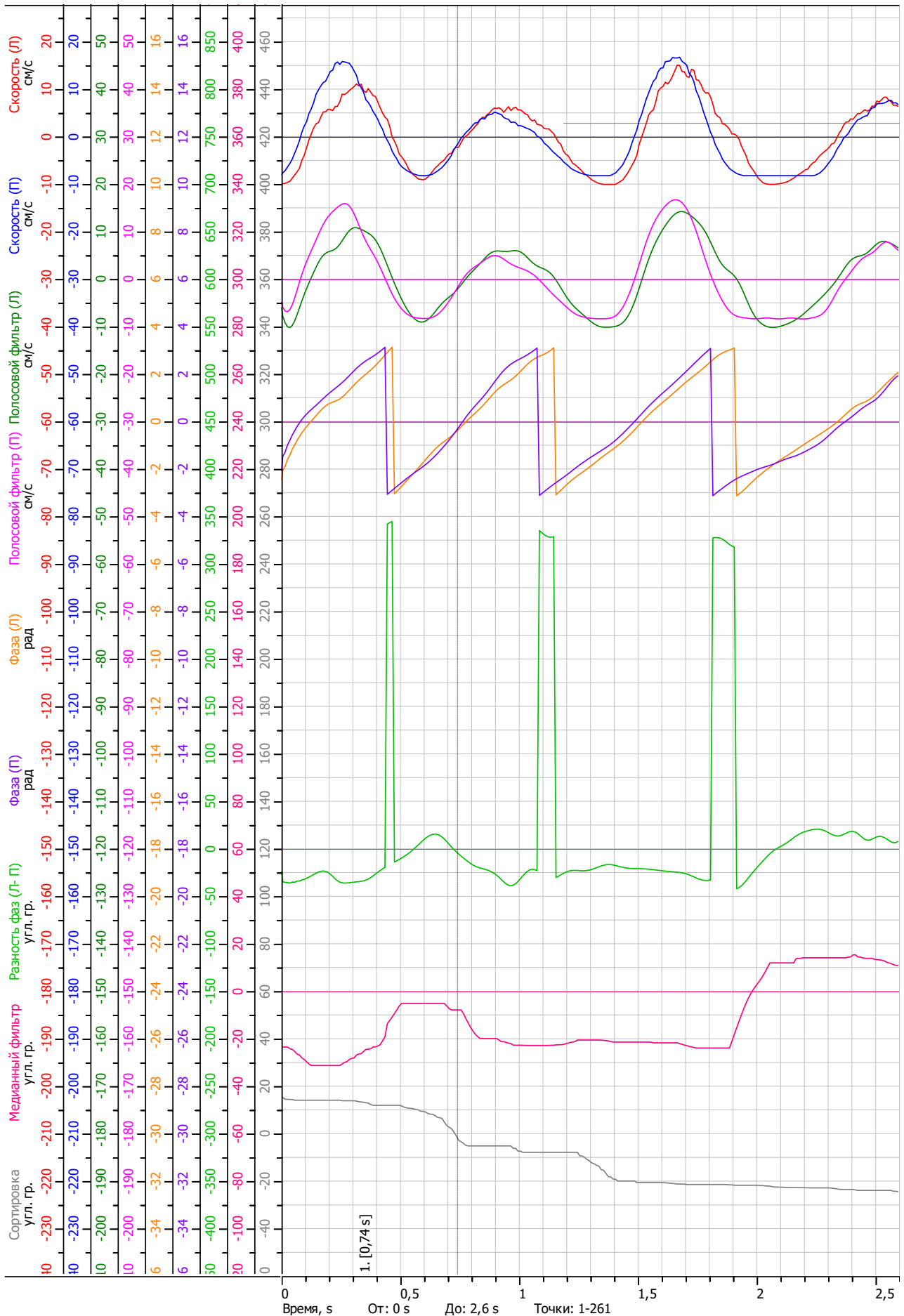


Рис. 3 Осциллограф математической обработки сигналов для нахождения разности фаз

бимануальных движений (на примере графомоторной пробы одного из испытуемых).

Слева по оси ординат указаны наименования каналов (их порядок сверху вниз можно понимать как этапы обработки данных) и поставлены им в соответствие по цвету шрифта шкалы амплитуд. «Л» и «П» означают левую и правую руку. Справа даны графики расчетных сигналов также в соответствии с цветом наименования канала (например, каналу «Скорость (Л)» присвоен красный цвет, и ему соответствует шкала амплитуд красного шрифта и кривая такого же цвета). Аналогичные сигналы для обеих рук (скорость; скорость, пропущенная через полосовой фильтр; фаза) совмещены относительно нуля и приведены в одинаковом масштабе по амплитуде.

Алгоритм вычисления разности фаз двух рук бимануального движения имеет следующий вид:

- 1) Смещение сигнала скорости относительно среднего арифметического (среднее арифметическое полученных данных равняется 0) – *синяя и красная* кривые; →
- 2) пропуск сигнала через полосовой КИХ-фильтр (окно верхнего фильтра – 0,01 Гц, окно нижнего фильтра – 10 Гц) – *лиловая и темно-зеленая* кривые; →
- 3) выделение фазы из сигнала преобразованием Гильберта – *фиолетовая и оранжевая* кривые; →
- 4) вычитание из фазы левой руки фазы правой;
- 5) преобразование радиан в градусы – *зеленая* кривая;
- 6) применение медианного фильтра<sup>4</sup> к сигналу разности фаз (размер окна – 50 точек) – *малиновая* кривая;
- 7) сортировка значений предыдущего сигнала по убыванию – *серая* кривая.

Соотнести этапы обработки данных с цветом получившейся кривой можно, воспользовавшись рисунком 3. При этом цвета последующих графиков зависимостей точно так же связаны с цветом кривых рисунка 3. Все вычисления выполнены в программном пакете PowerGraph 3.3 Professional.

---

<sup>4</sup> Медианный фильтр используется нами для избавления от кратковременных «выбросов» при вычислении разности фаз (см. *зеленую* кривую), связанных с особенностями цифровой обработки сигналов. Без применения фильтра технически получается, что в конце очередного цикла на доли секунды одна рука скачкообразно обгоняет другую по фазе на  $> 340^\circ$ . Физический смысл происходящего теряется – скачка «на самом деле» не было; нам «удобнее» воспринимать, что одна рука продолжает опережать другую по фазе  $< 20^\circ$ . С помощью медианного фильтра устраняется данная погрешность. Без этого фильтра абсолютные средние были бы завышены, а «роль» отстающей руки в интерпретации данных – преувеличена.

Другой величиной, информативной по отношению к величине синхронизации бимануальных движений, мы посчитали длительность временного участка с ведущей правой рукой, выраженного в процентном соотношении от всего времени бимануального движения. Для нахождения этой величины значения разности кривых по фазе ранжируются в порядке убывания и находится точка пересечения нулевой амплитуды (на рис. 3 отмечена вертикальной пунктирной линией). Тогда справа от точки пересечения окажется отрицательный фронт (значения амплитуды ниже нуля), длительность которого равна времени с ведущей правой рукой по фазе. Доля временного участка, ведомого правой рукой, от общего движения далее вычисляется по формуле:

$$= \frac{t_{\text{пр}}}{t_{\text{общ}}} \times 100\%,$$

где  $t_{\text{пр}}$  – доля временного участка с ведущей правой рукой, а  $t_{\text{общ}}$  – длительность всего бимануального движения. Расчет выполнен в программном пакете Microsoft Excel 2016.

Мы считаем, что величины синхронизации бимануальных движений можно рассматривать как меру сложности координации сочетанных движений.

Последующая статистическая обработка данных была осуществлена в программном пакете Statistica 12.6. Был применен однофакторный (фактор – уровень построения движения) и многофакторный дисперсионный анализ с повторными измерениями (полностью внутренний план), где одним из факторов являлся уровень построения движения (4 подуровня), а вторым – рука, исполняющая движение (2 подуровня). Для множественных сравнений во всех случаях применялся метод наименьших различий (LSD) Фишера.

В статистический анализ искомого сигнала (разности фаз, пропущенной через медианный фильтр) входит вычисление среднего квадратического (RMS), стандартного отклонения и максимального значения, а также доли движения с ведущей правой рукой (в процентах). Для двухфакторного дисперсионного анализа с повторениями оценивались эти же величины (кроме последней), но только на отсортированных по убыванию значениях для каждой из рук в отдельности.

## Результаты анализа синхронизации бимануальных движений методом разности фазовых кривых

Анализ разности фазовых кривых проводился по суммированным данным (120 рисунков на

одну переменную). Это обусловлено тем, что исследование бимануальной синхронизации движений связано с малыми временными интервалами (10-100 мс), следовательно предполагается, что искомые зависимости согласованности движения от семантической нагрузки и мануальных различий «невелики», из чего далее следует, что «достоверные» результаты можно получить только на сравнительно большой выборке<sup>5</sup>. У этого решения есть и теоретические предпосылки: мы проводили расчеты по суммированным данным, так как за единицу анализа взяли целое движение (пробу)<sup>6</sup>, а не самого испытуемого (точнее, усредненные пробы одного испытуемого).

Согласно результатам однофакторного дисперсионного анализа с повторными измерениями, влияние уровня построения движения статистически значимо по всем рассмотренным нами величинам. Данные средних значений по всем статистическим величинам представлены в таблице 1.

**Таблица 1**

Средние значения величин полного фазового сдвига и средняя доля временного интервала с лидирующей правой рукой по четырем графомоторным задачам

Анализируемые величины	Средние значения по уровням построения движения				F-критерий	df	p	$\eta^2$
	B	C <sub>2</sub>	D	E				
Средний сдвиг фазы, градусы (°)	38°14′	36°26′	42°19′	48°23′	7,266	3(357)	< 0,001	0,13
Стандартное отклонение сдвига фазы, градусы (°)	23°37′	30°37′	36°20′	42°54′	18,346	3(357)	< 0,001	0,17
Максимальный сдвиг фазы, градусы (°)	87°22′	91°32′	110°56′	135°47′	14,256	3(357)	< 0,001	0,16
Доля движения правой рукой, проценты (%)	87,53	73,11	70,50	68,55	15,470	3(357)	< 0,001	0,12

<sup>5</sup> Подробнее см., например, пособие по статистическому пакету Statistica (*STATISTICA Electronic Manual*).

<sup>6</sup> Поэтому число степеней свободы кратно больше числа испытуемых.

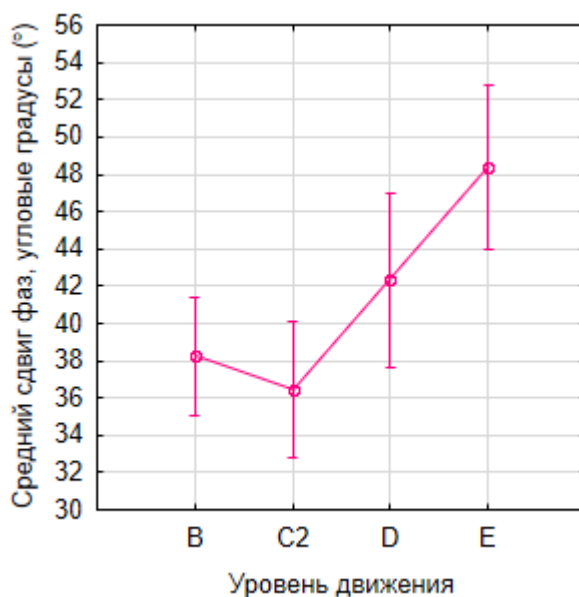


Для средних значений сдвига фазы график этой зависимости принял форму «галочки» – четко видно разделение движений по смыслу на простые (В, С<sub>2</sub>) и сложные (D, E), причем в множестве семантически сложных движений предметные и символические действия существенно отличаются друг от друга (см. рис. 4). Это утверждение подтверждается результатами парного сравнения (см. табл. 2).

### Таблица 2

Матрица значимости парных различий между уровнями движения по среднему сдвигу фаз

Уровень	В	С <sub>2</sub>	D	E	Сумма
В		0,524	0,146	< 0,001	1
С <sub>2</sub>	0,524		<0,037	< 0,001	2
D	0,146	< 0,037		< 0,031	2
E	< 0,001	< 0,001	< 0,031		3

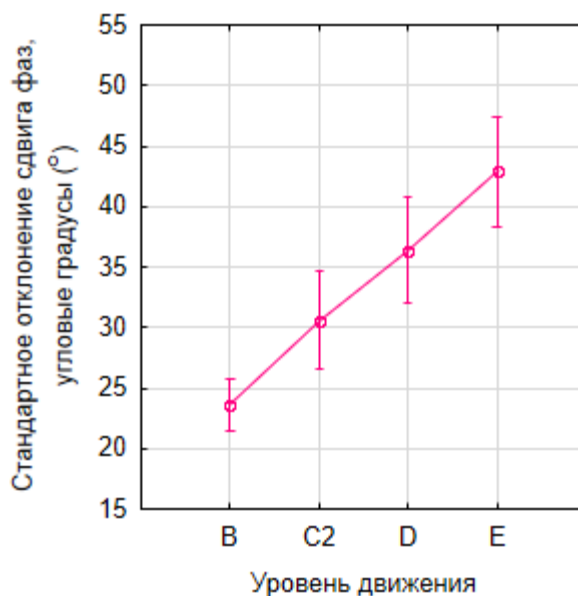


**Рис. 4.** График зависимости среднего сдвига фазы двух рук от уровня построения движения.

Расстояние между выделенными нами тремя группами движений равняется примерно 6°. Подтверждается предполагаемая нами закономерность, что при попарном сравнении внешне схожих задач уровней В – E и С<sub>2</sub> – D значения для первых членов пары ниже, чем для вторых, семантически окрашенных (особенно это отражается в первой паре движений).

Для стандартного отклонения сдвига фазы и ее максимального значения на всем участке

движения мы уже наблюдаем простую линейную зависимость. Графики стандартного отклонения и максимального значения сдвига фаз по всем уровням движения представлены на рис. 5 и рис. 6 соответственно.



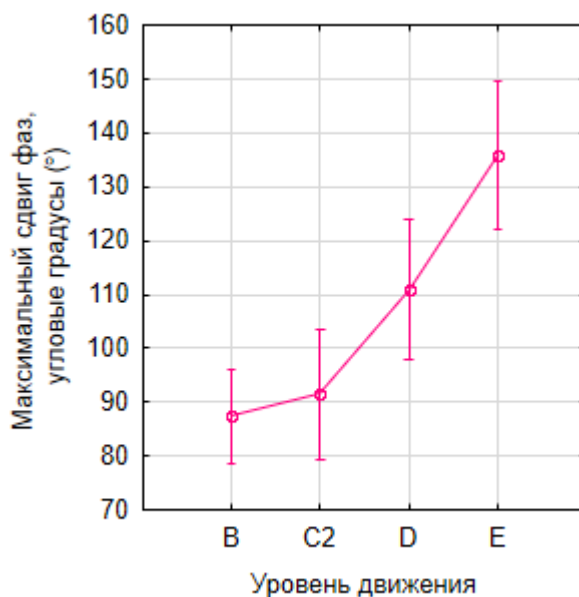
**Рис. 5.** График зависимости стандартного отклонения фазового сдвига от уровня построения движения.

По результатам множественных сравнений стандартного отклонения сдвига фазы все четыре класса движений статистически значимо отличаются друг от друга (см. табл. 3). По стандартному отклонению расстояние от предыдущего уровня до следующего снова составляет примерно  $6^\circ$ .

**Таблица 3**

Матрица значимости парных различий между уровнями движения по стандартному отклонению сдвига фаз

Уровень	В	С2	D	E	Сумма
В		< 0,010	< 0,001	< 0,001	3
С2	< 0,001		< 0,035	< 0,001	3
D	< 0,001	< 0,035		< 0,016	3
E	< 0,001	< 0,001	< 0,016		3



**Рис. 6.** График зависимости максимального фазового сдвига от уровня построения движения.

Апостериорный анализ максимального рассогласования по фазе между каждым уровнем движения позволяет выделить среди них три группы: низших движений (B, C2), предметных действий (D) и символических действий (E). Данные см. в табл. 4.

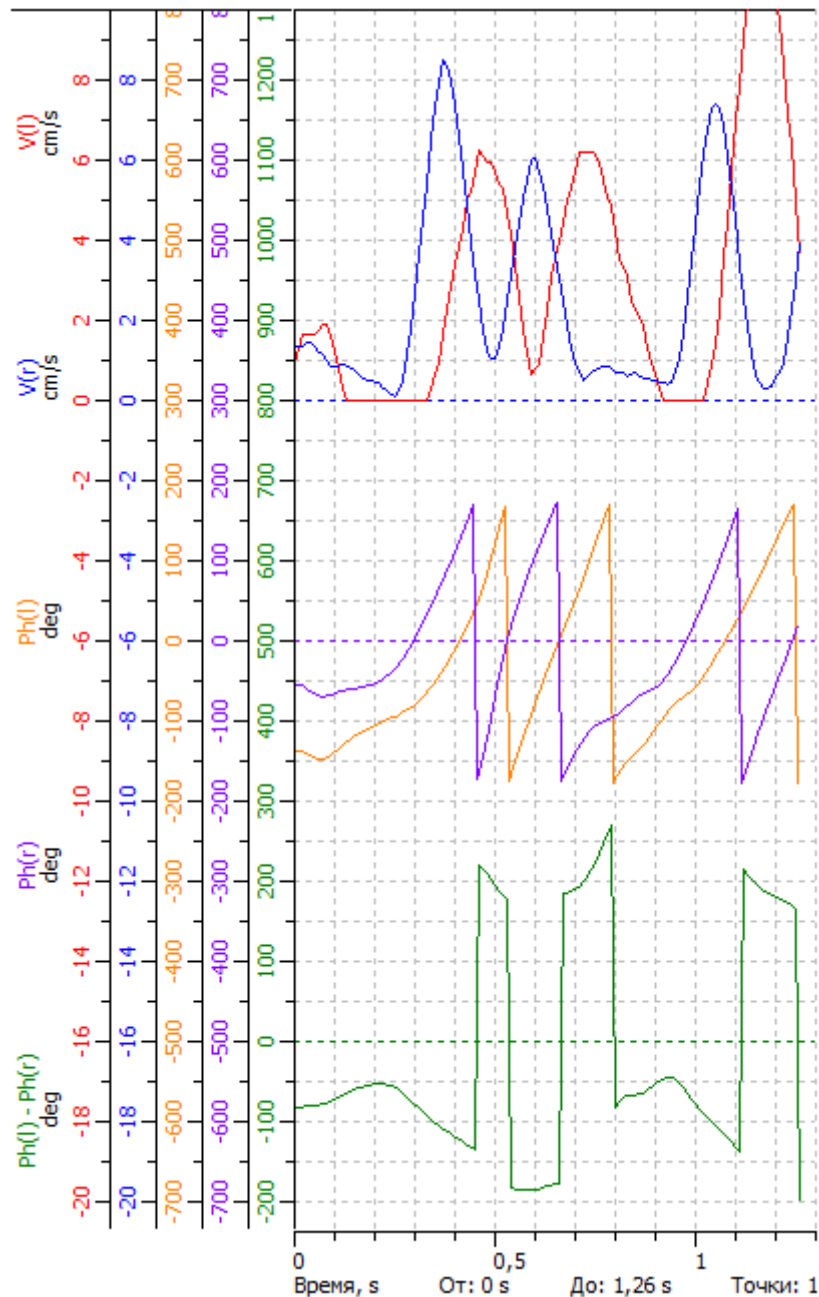
#### Таблица 4

Матрица значимости парных различий между уровнями движения по максимальному сдвигу фаз

Уровень	B	C2	D	E	Сумма
B		0,617	< 0,005	< 0,001	2
C2	0,617		< 0,020	< 0,001	2
D	< 0,005	< 0,020		< 0,003	3
E	< 0,001	< 0,001	< 0,003		3

Вместе с возрастанием фазовой задержки бимануальных движений возрастает и отклонение от нее, что позволяет нам рассматривать синхронизацию движений, опосредованных предметом и знаком, как более сложно исполнимую, или, иначе, как поддающуюся большему рассогласованию на своем пути (т.е. динамически менее стабильную). Отсюда можно предположить, что сам процесс синхронизации, то есть исследование «динамики» каждой пробы, а не только ее «статики», для разных по смыслу бимануальных движений и их графических выражений будет качественно различным.

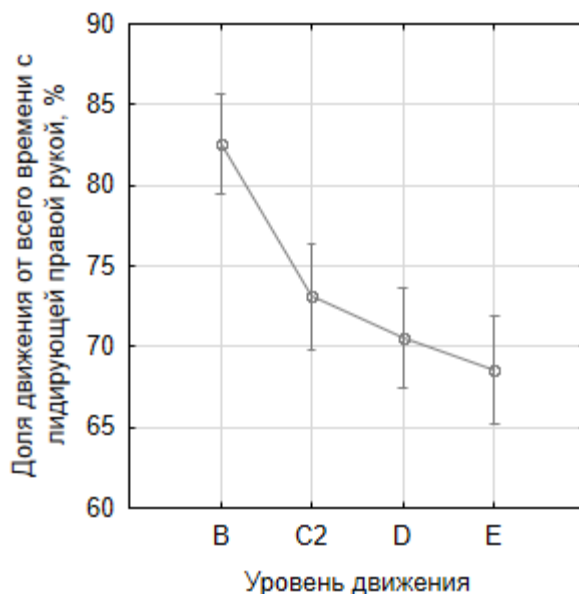
Для подтверждения этого предположения приведем пример. Визуальный анализ графиков индивидуальных движений в совокупности с их статистической обработкой позволяет сделать вывод о том, что для некоторых испытуемых более сложные в смысловом отношении графические движения, особенно координируемые высшим уровнем Е, изначально строятся или спонтанно «скатываются» в противофазовые движения, то есть в такие, при которых одна рука набирает скорость, а другая в то же время ее теряет. Пример подобного противофазового движения показан на рис. 7. Отметим, что это ценная фактологическая находка. Нам неизвестны работы, в которых были получены аналогичные результаты. Таким образом, помимо того, что график максимального сдвига фазы в общих чертах повторяет другие графики оценки синхронизации движений, здесь обнаруживается не только количественное, но и существенное качественное различие.



**Рис. 7.** Пример противофазового движения (письма).

Верхние два графика – кривые скорости (красная – левая, синяя – правая рука), под ними – фазовые кривые (оранжевая – левая, фиолетовая – правая рука), в самом низу – разность фазовых кривых. Видно, что нижний график напоминает меандр, размах сигнала которого колеблется примерно в диапазоне от  $-180^\circ$  до  $180^\circ$ .

Отдельный интерес представляет время, в течение которого лидировала (т.е. «шла впереди») одна из рук. Воздействие фактора уровня построения движения на время, в течение которого по фазе идет впереди одна из рук, показано на рис. 8.



**Рис. 8.** График зависимости отношения доли времени с лидирующей правой рукой ко всей протяженности движения от уровня движения.

На рис. 8 видно, что по мере продвижения от уровня к уровню снизу вверх (т.е. от уровня В к уровню Е) временная доля бимануального движения, ведомого правой рукой, резко снижается при переходе с уровня синергий и штампов до уровня пространственного поля С2, а далее это падение от предыдущего уровня к последующему замедляется. В среднем соотношение длительности участков движений, ведомых левой и правой рукой, выраженное в долях, получается ~ 1:3 соответственно, а диапазон длительности движения, ведомого правой рукой колеблется в пределах от 87,5% (уровень В) до 68,5% (уровень Е). Примерно в обратных значениях повышается доля продолжительности участков бимануальных движений, ведомых уже левой, субдоминантной рукой<sup>7</sup>. Вспомнив график зависимости разности фазовых кривых бимануального движения, можно сделать вывод о том, что технически рассогласование движения увеличивается за счёт возрастания участков движений, на которых ведущей (по фазе) является левая рука. Однако как мы узнаем дальше из результатов анализа двухфакторного взаимодействия уровня построения движения и руки, исполняющей это движение, этот вывод точно не подходит всем построениям движения и в целом скорее является поверхностным.

Двухфакторные взаимодействия типа двигательной задачи и руки статистически значимы по всем избранным нами величинам. В первую очередь взаимодействие этих факторов позволит

<sup>7</sup> Случаями полной синхронизации движений здесь можно пренебречь.

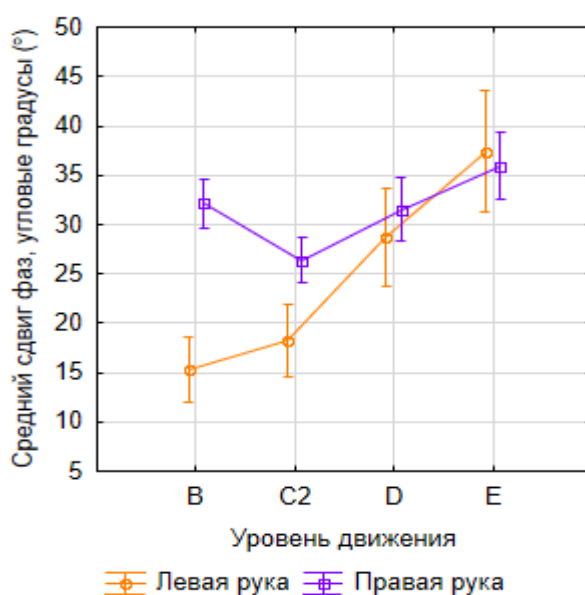
нам оценить вклад каждой руки в каждое задание и поможет сделать выводы о специфике межполушарного взаимодействия в рассматриваемых случаях. Статистические данные по двухфакторному взаимодействию приведены в таблице 5.

**Таблица 5**

Средние значения величин фазового сдвига каждой руки в отдельности по четырем графомоторным задачам (в ячейках средних значений вверху указаны значения левой руки, внизу – правой)

Анализируемые величины	Средние значения по уровням движения				F-критерий	df	p	$\eta^2$
	B	C2	D	E				
Средний сдвиг фазы, градусы (°)	15°17′	18°13′	28°44′	37°22′	14,721	3(357)	< 0,001	0,12
	32°8′	26°20′	31°33′	35°58′				
Стандартное отклонение сдвига фаз, градусы (°)	10°37′	11°39′	23°55′	29°4′	13,105	3(357)	< 0,001	0,11
	19°21′	18°35′	22°23′	24°54′				
Максимальный сдвиг фазы, градусы (°)	43°45′	56°56′	78°40′	102°8′	5,139	3(357)	< 0,002	0,08
	78°23′	72°31′	87°37′	102°4′				

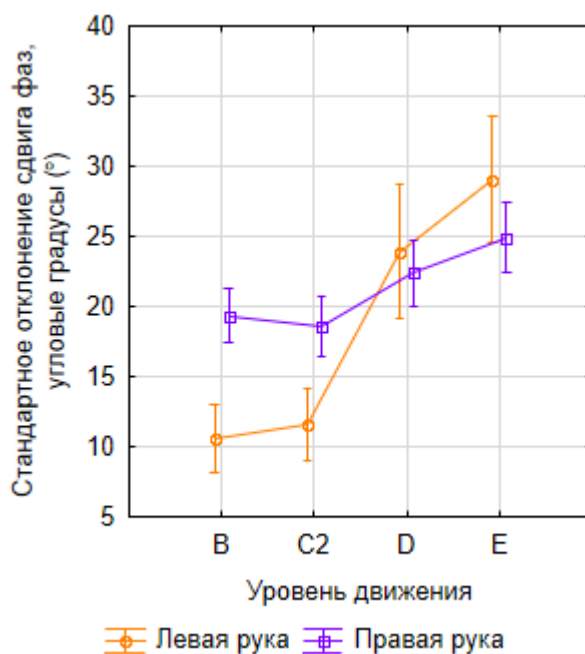
Рассмотрим обнаруженные закономерности. График зависимости разности фазовых кривых от уровня построения движения для каждой из рук по отдельности показан на рис. 9.



**Рис. 9.** График зависимости фазового сдвига от факторов уровня движения и исполняющей движение руки.

Стоит обратить внимание на следующие моменты. Во-первых, абсолютная разница между средними фазовой задержки обеих рук постепенно уменьшается, начиная с уровня В. Здесь разница составляет около  $16^{\circ}51'$ , для уровня С2 –  $8^{\circ}8'$ , для предметного уровня D – уже  $2^{\circ}49'$ , а для уровня символических координаций E – всего лишь  $1^{\circ}25'$ . Во-вторых, для первых трех двигательных задач в среднем фазовый сдвиг больше для правой руки, и лишь в последнем случае – при письме – для левой. В-третьих, для левой руки характерен последовательный подъем от уровня к уровню и в целом более широкий разброс данных – порядка  $22^{\circ}5'$ ; в свою очередь, для правой руки разброс данных укладывается в  $9^{\circ}37'$ . Таким образом, разброс значений двух рук по всем графомоторным задачам различается более чем в два раза, и как наименьшие (уровень В), так и наибольшие (уровень E) значения фазового сдвига при раздельном анализе рук принадлежат субдоминантной левой руке.

Общий характер пересечения кривых стандартного отклонения фазового сдвига отдельно правой и отдельно левой руки по всем уровням движения совпадает с предыдущим (см. рис. 10).

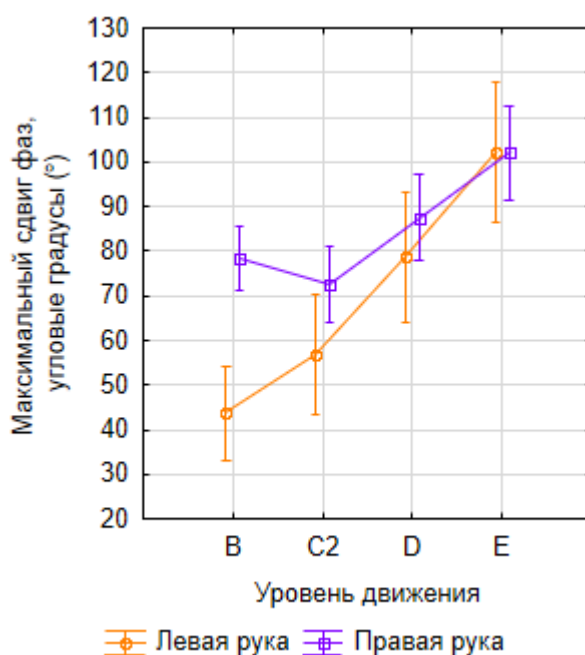


**Рис. 10.** График зависимости стандартного отклонения фазового сдвига от факторов уровня движения и исполняющей движение руки.

По стандартному отклонению от фазовой разности для уровней В и С2 характерно меньшее значение величины для левой руки, а для движений, опосредованных предметом и символом,



характерны относительно меньшие колебания от средней фазовой задержки правой рукой. Разброс значений в три с половиной раза больше для левой руки – он составляет  $18^{\circ}26'$ , тогда как для правой руки – всего лишь  $5^{\circ}33'$ . Таким образом, только для класса предметных и символических действий участки движений, ведомых правой рукой, отличаются большей относительной стабильностью по сравнению с левой рукой в том же самом задании; в целом же правая рука демонстрирует более высокую лабильность, особенно в координациях ритмического и пространственного типа, в сравнении с левой рукой.



**Рис. 11.** График зависимости максимума фазового сдвига от факторов уровня движения и исполняющей движение руки.

По всем уровням построения движений значение максимума фазового сдвига меньше для левой руки, кроме последнего уровня (см. рис 11). Разность максимальных значений рассогласования двуручных движений существенно выше для движений, в большей мере координируемых образами ритмических штампов и сугубо пространственными образами, точнее, для уровня В эта разность составляет целых  $34^{\circ}39'$ , для уровня С2 –  $15^{\circ}35'$ , а для движений предметного уровня разница максимальных значений десинхронизации между обеими руками равна  $8^{\circ}57'$ . Для наивысшего уровня Е аналогичная разница вовсе исчисляется минутами. Последний факт подтверждает, что такой графический навык как письмо произвольно (или вполне естественным образом) может экфорироваться в противофазе (по скорости). Разброс значений в два с половиной раза выше для левой руки:  $58^{\circ}23'$  против  $23^{\circ}41'$ .

По всем рассмотренным взаимодействиям эффектов наблюдается одна и та же закономерность (с локальными изменениями): по мере возрастания смысловой нагрузки двигательной задачи увеличиваются средние фазовых величин, причем чем содержательно легче задача, тем статистически лучшие показатели наряду с, наоборот, уменьшающейся долей лидерства по времени демонстрирует левая (субдоминантная) рука. Опосредование бимануальных движений семантически развитыми образами (в первую очередь предметами и знаками) ведет к нарушению двигательного стереотипа с ведущей (по фазе) правой рукой и актуализации более комплексного сложного взаимодействия функциональных координационных систем.

## Обсуждение

Для начала отметим, что выбранные нами переменные (разность фаз и соотношение временных интервалов с ведущей рукой по фазе) оправдали себя в качестве меры оценки бимануальной координации уже при анализе усредненных по всему блоку движений, не углубляясь в их микродинамическую структуру (что нисколько не отменяет полезности проведения и такого рода исследований). В целом за правило можно взять то, что бимануальные движения синхронизируются с задержкой одной руки от другой. Величина рассогласования, ее постоянство и размах, а также доля временного отрезка с лидирующей рукой этой задержки может являться мерой сложности двигательной задачи.

Подтверждается основное предположение, что с увеличением смысловой нагрузки двигательных заданий, внешне выполняемых схожим образом, увеличивается десинхронизация движений. Вместе с этим повышается и суммарная длительность участков движений, по фазе ведомых левой (субдоминантной) рукой. Показательно, что эта зависимость как бы игнорирует траектории движений, выражая не внешне наблюдаемую схожесть исполняемых операций, а внутреннюю психологическую и психофизиологическую их оснастку – смысловое содержание и качественно отличную мозговую организацию каждого из движений. Мы предполагаем, что полученные данные являются моторным выражением особенностей межполушарного взаимодействия различных классов движений, и, согласно им, чем семантически сложнее выполняемая испытуемым (двигательная) задача, тем более комплексным, сложным и, по всей видимости, крайне желательным (необходимым) является это взаимодействие. Таким образом, содержательно простые задачи, реализуемые с большей опорой на субкортикальный субстрат и периферийные кортикальные поля, а также на мозжечок, как правило, выполняются точнее в отношении синхронизации за счет большей

симметричной функциональности этих образований, в отличие от содержательно сложных задач, которые могут быть решены только новыми кортикальными субстратами и которым свойственна дифференциация сторон той или иной деятельности.

По результатам метода разности фазовых кривых уровень синергий и штампов В имеет сравнительно небольшое среднее и наименьшее стандартное отклонение сдвига фаз среди всех рассмотренных нами бимануальных движений. В целом это ожидаемый результат, предсказываемый теорией построения движений. Примечательно то, что это движение едва ли можно назвать автоматизированным, тем не менее правильно поставленная задача перед испытуемым вызывает адекватную для ее решения систему обратных связей – в данном случае преимущественно проприоцептивную. Другими словами, происходит автоматическая семантическая оценка моторной задачи (см. «принцип равной простоты»).

Отметим, помимо того, что для низших уровней построения движений свойственен наименьший средний фазовый сдвиг как таковой, в то же самое время для них характерно и наибольшее расхождение этого сдвига при оценке «вклада» каждой руки в согласованность движения. Напротив, для более высоких уровней построения движений запоздалость одной руки от другой высока, однако обе руки в равной степени вносят свой вклад в этот показатель. При всем этом общее правило таково, что по мере усложнения афферентации синхронизация движения распадается сильнее.

Исходя из этих зависимостей, напрашиваются два противоречивых сценария. Первый, что реализация синхронного двуручного движения нарушается не из-за субдоминантной левой руки, как это подсказывает здравый смысл, а из-за правой, судя по сравнениям величины десинхронизации по каждой руке отдельно. Второй, что в рассогласованности движения все-таки «виновата» левая рука – чем больше она «вырывается» вперед, тем больше она нарушает паттерн движения как движения с временной задержкой. И, что созвучно, для менее сложных в семантическом отношении движений левая рука справляется с заданиями ловчее, чем правая. На наш взгляд, это не совсем так – в том смысле, что такой ответ лишь порождает следующий вопрос: почему левая рука «вырывается» вперед в одних заданиях чаще чем в других?

Действительно, левая рука по всем непредметным и несимволическим задачам суммарно движется стабильнее с фазовой задержкой относительно правой, и для левой руки в то же

время свойственна меньшая степень рассогласования (за исключением письма). По всей видимости, это объясняется тем обстоятельством, что для низших бимануальных движений, особенно для ритмических, циклических движений, характерен стойкий паттерн (образ), завязанный на ведущей позиции правой (доминантной) руки, и сравнительная устойчивость к удержанию этого паттерна. Тогда даже если и происходят те редкие моменты (см. рис. 8-10), когда этот паттерн выбивается из проложенной колеи, то мы и наблюдаем меньшее отклонение фазового сдвига от полной синхронизации (углового нуля) левой руки по сравнению с правой. По мере обобщения и осмысления движения этот паттерн нарушается, и теперь левая рука не просто следует за правой, выполняя арьергардную роль, а на некоторых более продолжительных участках (в среднем до трети от общего времени) является лидирующей. При детальном рассмотрении (особенно на бимануальном письме) обнаруживаются соревновательные тенденции: обе руки «тянут одеяло на себя», попеременно вырываясь вперед.

Мы предполагаем, что нарушение динамического (фазового) стереотипа уровня В при «насыщении» его смыслом, то есть при переходе к письму, происходит в силу более комплексного межполушарного взаимодействия, требуемого для содержательно сложных задач, которое в итоге может приводить к спонтанному экфорированию движений в противофазе. Другими словами, спонтанное поочередное (по нарастанию скорости) бимануальное написание слова «папа» следует рассматривать не как случай серьезной десинхронизации движений, а как особый вариант координации высших движений в норме. Подобные противофазовые движения в том числе могут быть вызваны повышающейся «сознательностью» для решения поставленной задачи, что может выражаться в смене билатеральной асимметрии для семантически совершенных действий. Мы имеем в виду, что субъект сталкивается с такой задачей, которая вынуждает его обращаться к сознательному контролю, минуя более примитивные формы регуляции движений. Складывающаяся картина двигательной активности напоминает известные механизмы реципрокного межполушарного взаимодействия при угнетении одного из полушарий (например, вклад каждого полушария в константность восприятия размеров, восприятия перспективных построений и т.д.) [Деглин, 1996; Егоров, 2006]. Также это предположение перекликается с гипотезой «антагонизма доминант», которая развивает соответствующие положения учения А.А. Ухтомского, приложенной к проблемам бинокулярной конкуренции [Ухтомский, 1978; Берлов, 2004]. Так, в случае соревнования полей зрения происходит чередование доминирования некоторых областей обоих полушарий, согласно данным ЭЭГ [Белов, 1989; Павлова, 1988].

Потенциальную модель взаимодействия соревнующихся доминантных установок целесообразно прикладывать и на сферу выполнения двигательных задач. Вслед за сложившейся терминологией в изучении стереопсиса мы предлагаем синхронизационный паттерн уровня синергий и штампов назвать *бимануальным доминированием*, а альтернативную ему противофазовую (по скорости) координацию сочетанных движений – *бимануальной конкуренцией*. Промежуточные состояния можно охарактеризовать как *частичное доминирование*.

В литературе по проблемам бимануальной координации нам не встречались подобного рода данные о противофазовом по скорости характере двуручных движений (так как зарубежными авторами исследовались преимущественно движения ритмического или переместительного характера без какой-либо более осмысленной цели). Обычно о противофазовом движении заходит речь, когда исследуются разнонаправленные движения и анализируются кривые перемещения. Естественно ожидать, что при оптимальных скоростях движения не сойдутся в сонаправленные, однако это мало связано с фазовыми кривыми по скорости, которые могут по-прежнему находиться в состоянии небольшого фазового сдвига, то есть при исполнении зеркальных бимануальных движений прирост скорости одной руки с незначительным сдвигом совпадает с приростом скорости второй. Мы же обнаружили поочередную смену скоростей двух рук в случае сонаправленного сочетанного движения (письма).

## Выводы

1. С увеличением семантической нагрузки двигательной задачи возрастает (полная) десинхронизация графических бимануальных движений. Возрастающий по своему качеству сенсорный синтез, адекватный для решения двигательной задачи, вызывает большие трудности в согласовании бимануальных одностипных действий.
2. По мере роста семантической сложности увеличивается длительность временного участка с лидирующей левой рукой. Складывающийся все более сложный и комплексный сенсорный синтез выражается моторной (мануальной) лабильностью.
3. Чем дольше лидирует правая рука, тем выше относительная рассогласованность правой руки от левой (левая рука изредка нагоняет и «нарушает» паттерн движения, а правая рука подавляющую часть времени «ведет» левую), но общий сдвиг фаз сравнительно невелик и постоянен – ситуация бимануального доминирования.

4. С увеличением временной доли лидерства левой руки относительная рассогласованность между обеими руками уменьшается (обе руки одинаково сильно выбиваются вперед), и вместе с этим растет полная десинхронизация – ситуация частичного бимануального доминирования вплоть до бимануальной конкуренции.

5. Степень синхронизации бимануальных движений (как разность фазовых кривых) является хорошим показателем «сложности» и «трудности» исполнительного этапа решения той или иной двигательной задачи.

## Литература

Белов Д.Р., Павлова Л.П. Корреляция между ЭЭГ-показателями межполушарной асимметрии и показателями асимметрии бинокулярной конкуренции. В кн.: Психофизиология человека в условиях перестройки. Уфа, 1989. С. 8–9.

Берлов Д.Н., Кануников И.Е., Павлова Л.П. Бинокулярная конкуренция и функциональная межполушарная асимметрия: от асимметрии к взаимодействию полушарий. Обзор состояния проблемы. В кн.: Функциональная межполушарная асимметрия. Хрестоматия. М.: Научный мир, 2004. С. 380–415.

Бернштейн Н.А. О построении движений. М.: Медгиз, 1947.

Бернштейн Н.А. Очерки по физиологии движений и физиологии активности. М.: Медицина, 1966.

Вассерман Л.И., Дорофеева С.А., Меерсон Я.А. Методы нейропсихологической диагностики: практическое руководство. СПб.: Стройлеспечать, 1997.

Гордеева Н.Д., Зинченко В.П. Функциональная структура действия. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1982.

Деглин В.Л. Лекции о функциональной асимметрии мозга человека. Женевская инициатива в психиатрии, Ассоциация психиатров Украины, 1996.

Егоров А.Ю. Нейропсихология девиантного поведения. СПб.: Речь, 2006.

Иоффе М.Е. Мозговые механизмы формирования новых движений при обучении: эволюция классических представлений. Вестник Российского фонда фундаментальных исследований, 2003, 1, 26–47.

Кришталь В.Н., Гончаров О.А. Анализ графомоторной активности субдоминантной руки при унимануальном и бимануальном условиях. Психологические исследования, 2020, 13(73), 4. <http://psystudy.ru>

Лурия А.Р. Высшие корковые функции человека. СПб.: Питер, 2018.

Назаров А.И. Влияние сложности и условий наблюдения маршрута ручных инструментальных движений на их воспроизведение по памяти. Вопросы психологии, 2020, 3, 158–170.

Павлова Л.П., Михеев И.Н. Асимметризация перцептивно-зрительного процесса как критерий индивидуально-типологических особенностей динамики кортикальной доминантной установки. В кн.: Психофизиология человека в условиях перестройки. Уфа, 1988. С. 43–45.

Ухтомский А.А. Избранные труды. Л.: Наука, 1978.

Хомская Е.Д., Привалова Н.Н., Ефимова Е.В., Степанова О.Б., Горина И.С. Методы оценки межполушарной асимметрии и межполушарного взаимодействия: учеб. пособие. М.: МГУ, 1995.

Fitts P.M. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 1954, 47(6), 381–391.

Huo S., Duan A., Li C., Zhou P., Ma W., Wang H., Navarro-Alacron D. Keypoint-Based Planar Bimanual Shaping of Deformable Linear Objects Under Environmental Constraints With Hierarchical Action Framework. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(2), 5222–5229. doi:10.1109/LRA.2022.3154842

Ivry R.B., Summers J.J., Diedrichsen J., Spencer R., Hazeltine E., Semjen A. A cognitive

neuroscience perspective on bimanual coordination and interference. In: *Neuro-behavioral determinants of interlimb coordination: A multidisciplinary approach*. Boston: Kluwer Academic, 2004. pp. 259–295.

Kelso J.A.S. Contrasting perspectives on order and regulation in movement. In: *Attention and performance IX*. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1981. pp. 437–457.

Kennerley S.W., Diedrichsen J., Semjen A., Ivry R.B. Callosotomy patients exhibit temporal and spatial uncoupling during continuous bimanual movements. *Nature Neuroscience*, 2002, 5, 376–381.

Krebs F., Asfour T. A Bimanual Manipulation Taxonomy. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(4), 11031–11038. doi:10.1109/LRA.2022.3196158

Lewis P.A., Miall R.C. Distinct systems for automatic and cognitively controlled time measurement: Evidence from neuroimaging. *Current Opinion in Neurobiology*, 2003, 13, 250–255.

Manoonpong P., Geng T., Kulvicius T., Porr B., Wörgötter F. Adaptive, Fast Walking in a Biped Robot under Neuronal Control and Learning. *PLoS Comput Biol*, 2007, 3(7), e134. doi:10.1371/journal.pcbi.0030134

Obhi S.S. Bimanual coordination: An unbalanced field of research. *Motor Control*, 2004, 8(2), 111–120.

Robertsson S.D., Zelaznik H.N., Lantero D.A., Gadacz K.E., Spencer R.M., Doffin J.G., Schneidt T. Correlations for timing consistency among tapping and drawing tasks: Evidence against a single timing process for motor control. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 1999, 25, 1316–1330.

Spencer R.M.C., Ivry R.B. Comparison of patients with Parkinson's or cerebellar lesions in the production of periodic movements involving event-based or emergent timing. *Brain and Cognition*, 2005, 58, 84–93.

Summers J.J., Maeder S., Hiraga C.Y., Alexander J.R.M. Coordination dynamics and attentional costs of continuous and discontinuous bimanual circle drawing movements. *Human Movement*



Science, 2008, 27, 823–837.

Talis V.L. Introduction. In: Biomechanics for Instructors. Springer Nature Switzerland AG, 2020. pp. xi–xxiv.

Wing A.M., Kristofferson A.B. Response delays and the timing of discrete motor responses. Perception & Psychophysics, 1973, 14, 5–12.

Zelaznik H.N., Spencer R.M., Doffin J.G. Temporal precision in tapping and circle drawing movements at preferred rates is not correlated: Further evidence against timing as a general-purpose ability. Journal of Motor Behavior, 2000, 32, 193–199.

Zelaznik H.N., Spencer R.M.C., Ivry R.B. Dissociation of explicit and implicit timing in repetitive tapping and drawing movements. Journal of Experimental Psychology, Human Perception and Performance, 2002, 28, 575–588.

Zelaznik H.N., Spencer R.M., Ivry R.B., Baria A., Bloom M., Dolansky L., Justice S., Patterson K., Whetter E. Timing variability in circle drawing and tapping: Probing the relationship between event and emergent timing. Journal of Motor Behavior, 2005, 37, 395–403

Поступила в редакцию: 02 февраля 2022 г. Дата публикации: 31 октября 2022 г.

### Сведения об авторах

*Кришталь Валерий Николаевич.* ассистент кафедры психологии, Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия.

E-mail: [syddielion@gmail.com](mailto:syddielion@gmail.com)

*Гончаров Олег Анатольевич.* Доктор психологических наук, профессор кафедры общей психологии института общественных наук РАНХиГС при Президенте РФ, Москва, Россия.

E-mail: [gonchar1000@gmail.com](mailto:gonchar1000@gmail.com)

### Ссылка для цитирования

Кришталь В.Н., Гончаров О.А., Синхронизация графических бимануальных движений с

Кришталь В.Н., Гончаров О.А. Синхронизация графических бимануальных движений...

разной семантической нагрузкой. Психологические исследования. 2022. Т. 15, № 85-86. С. 7.

URL: <https://psystudy.ru>

Адрес статьи: <https://doi.org/10.54359/ps.v15i85.1328>

Кришталь В.Н.<sup>1</sup>, Гончаров О.А.<sup>2</sup> Синхронизация графических бимануальных движений с разной семантической нагрузкой

*Cryshstal V.N.<sup>1</sup>, Goncharov O.A.<sup>2</sup> Synchronization of graphic bimanual movements with different semantic load*

<sup>1</sup> Dubna State University, Dubna, Russia

<sup>2</sup> Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow, Russia

In the current study we analyzed four types of graphomotor tasks that were performed bimanually to examine the synchronization of movements between both hands. The graphomotor tasks were selected based on the hierarchical organization of motor activity proposed by N.A. Bernstein: drawing a repeated broken line (level B), drawing a square from memory (level C2), drawing a house (level D), and writing the word "father (papa)" in capital letters (level E). The study involved 15 right-handed students who completed 64 drawings each, resulting in a total of 960 images analyzed. The mismatch between bimanual movements was analyzed as the difference in the phase curves of both hands. Statistical analysis was performed using the repeated measures ANOVA with factors for the level of movement construction and the hand performing the movement. The semantic complexity of the motor task was found to be directly associated with the magnitude of movement mismatch. Based on the results, we propose two types of bimanual movement synchronization: bimanual dominance (complete and partial) and bimanual competition. Bimanual dominance is specific to semantically simple tasks, whereas bimanual competition is more related to complex tasks.

**Keywords:** levels of movement construction, bimanual coordination, interhemispheric asymmetry and interaction, graphomotor activity

## References

Belov D.R., Pavlova L.P. Korrelyatsiya mezhdru EEG-pokazatelyami mezhpolutsharnoi asimmetrii i pokazatelyami asimmetrii binokulyarnoi konkurentsii. In: Psikhofiziologiya cheloveka v usloviyakh perestroiki. Ufa, 1989. pp. 8–9.

Berlov D.N., Kanunikov I.E., Pavlova L.P. Binokulyarnaya konkurentsia i funktsional'naya mezhpolutsharnaya asimmetriya: ot asimmetrii k vzaimodeistviyu polusharii. Obzor sostoyaniya problemy. In: Funktsional'naya mezhpolutsharnaya asimmetriya. Khrestomatiya. M.: Nauchnyi mir, 2004. pp. 380–415.

Bernshtein N.A. O postroenii dvizhenii. M.: Medgiz, 1947.

Bernshtein N.A. Ocherki po fiziologii dvizhenii i fiziologii aktivnosti. M.: Meditsina, 1966.

Deglin V.L. Lektsii o funktsional'noi asimmetrii mozga cheloveka. Zhenevskaya initsiativa v psikhiiatrii, Assotsiatsiya psikhiatrov Ukrainy, 1996.

Egorov A.Yu. Neiropsikhologiya deviantnogo povedeniya. SPb.: Rech'. 2006.

Fitts P.M. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 1954, 47(6), 381–391.

Gordeeva N.D., Zinchenko V.P. Funktsional'naya struktura deistviya. M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 1982.

Huo S., Duan A., Li C., Zhou P., Ma W., Wang H., Navarro-Alacron D. Keypoint-Based Planar Bimanual Shaping of Deformable Linear Objects Under Environmental Constraints With Hierarchical Action Framework. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(2), 5222–5229. doi:10.1109/LRA.2022.3154842

Ioffe M.E. Mozgovye mekhanizmy formirovaniya novykh dvizhenii pri obuchenii: evolyutsiya klassicheskikh predstavlenii. *Vestnik Rossiiskogo fonda fundamental'nykh issledovaniy*, 2003, 1, 26–47.

Ivry R.B., Summers J.J., Diedrichsen J., Spencer R., Hazeltine E., Semjen A. A cognitive neuroscience perspective on bimanual coordination and interference. In: *Neuro-behavioral determinants of interlimb coordination: A multidisciplinary approach*. Boston: Kluwer Academic, 2004. pp. 259–295.

Kelso J.A.S. Contrasting perspectives on order and regulation in movement. In: *Attention and performance IX*. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1981. pp. 437–457.

Kennerley S.W., Diedrichsen J., Semjen A., Ivry R.B. Callosotomy patients exhibit temporal and spatial uncoupling during continuous bimanual movements. *Nature Neuroscience*, 2002, 5, 376–381.

Khomsкая E.D., Privalova N.N, Efimova E.V., Stepanova O.B., Gorina I.S. *Metody otsenki mezhpolutsharnoi asimmetrii i mezhpolutsharnogo vzaimodeistviya: ucheb. posobie*. M.: MGU, 1995.

Krebs F., Asfour T. A Bimanual Manipulation Taxonomy. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(4), 11031–11038. doi:10.1109/LRA.2022.3196158

Krishtal' V.N., Goncharov O.A. Analiz grafomotornoi aktivnosti subdominantnoi ruki pri unimanual'nom i bimanual'nom usloviyakh. *Psikhologicheskie issledovaniya*, 2020, 13(73), 4. <http://psystudy.ru>

Lewis P.A., Miall R.C. Distinct systems for automatic and cognitively controlled time measurement: Evidence from neuroimaging. *Current Opinion in Neurobiology*, 2003, 13, 250–255.

Luriya A.R. *Vysshie korkovye funktsii cheloveka*. SPb.: Piter, 2018.

Manoonpong P., Geng T., Kulvicius T., Porr B., Wörgötter F. Adaptive, Fast Walking in a Biped Robot under Neuronal Control and Learning. *PLoS Comput Biol*, 2007, 3(7), e134. doi:10.1371/journal.pcbi.0030134

Nazarov A.I. Vliyanie slozhnosti i uslovii nablyudeniya marshruta ruchnykh instrumental'nykh dvizhenii na ikh vosproizvedenie po pamyati. *Voprosy psikhologii*, 2020, 3, 158–170.

Obhi S.S. Bimanual coordination: An unbalanced field of research. *Motor Control*, 2004, 8(2), 111–120.

Pavlova L.P., Mikheev I.N. Asimmetrizatsiya pertseptivno-zritel'nogo protsessa kak kriterii individual'no-tipologicheskikh osobennostei dinamiki kortikal'noi dominantnoi ustanovki. In: *Psikhofiziologiya cheloveka v usloviyakh perestroiki*. Ufa. 1988. pp. 43–45.

Robertsson S.D., Zelaznik H.N., Lantero D.A., Gadacz K.E., Spencer R.M., Doffin J.G., Schneidt T. Correlations for timing consistency among tapping and drawing tasks: Evidence against a single timing process for motor control. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 1999, 25, 1316–1330.

Spencer R.M.C., Ivry R.B. Comparison of patients with Parkinson's or cerebellar lesions in the production of periodic movements involving event-based or emergent timing. *Brain and Cognition*,

2005, 58, 84–93.

Summers J.J., Maeder S., Hiraga C.Y., Alexander J.R.M. Coordination dynamics and attentional costs of continuous and discontinuous bimanual circle drawing movements. *Human Movement Science*, 2008, 27, 823–837.

Talis V.L. Introduction. In: *Biomechanics for Instructors*. Springer Nature Switzerland AG, 2020. pp. xi–xxiv.

Ukhtomskii A.A. *Izbrannye trudy*. L.: Nauka, 1978.

Vasserman L.I., Dorofeeva S.A., Meerson Ya.A. *Metody neiropsikhologicheskoi diagnostiki: prakticheskoe rukovodstvo*. SPb.: Stroilespechat', 1997.

Wing A.M., Kristofferson A.B. Response delays and the timing of discrete motor responses. *Perception & Psychophysics*, 1973, 14, 5–12.

Zelaznik H.N., Spencer R.M., Doffin J.G. Temporal precision in tapping and circle drawing movements at preferred rates is not correlated: Further evidence against timing as a general-purpose ability. *Journal of Motor Behavior*, 2000, 32, 193–199.

Zelaznik H.N., Spencer R.M.C., Ivry R.B. Dissociation of explicit and implicit timing in repetitive tapping and drawing movements. *Journal of Experimental Psychology, Human Perception and Performance*, 2002, 28, 575–588.

Zelaznik H. N., Spencer R.M., Ivry R.B., Baria A., Bloom M., Dolansky L., Justice S., Patterson K., Whetter E. Timing variability in circle drawing and tapping: Probing the relationship between event and emergent timing. *Journal of Motor Behavior*, 2005, 37. 395–403

#### Information about authors

Crystal V.N. Assistant of the Department of Psychology, Dubna State University, ul. Universitetskaya, 19, 141982 Dubna, Russia.

E-mail: [syddielion@gmail.com](mailto:syddielion@gmail.com)

Goncharov O.A. Doctor of Psychology, professor of the Department of Psychology, RANEPА,  
prospekt Vernadskogo, 82, 119571 Moscow, Russia.

E-mail: [gonchar1000@gmail.com](mailto:gonchar1000@gmail.com)

Cryshtal V.N., Goncharov O.A. Synchronization of graphic bimanual movements with different  
semantic load. *Psikhologicheskie Issledovaniya*, 2022, Vol. 15, No. 85-86, p. 7. <https://psystudy.ru>