

Исследования сенсомоторных серийных действий: *status quo*

А.И. Назаров, А.В. Набатов

Представлен обзор основных методик и результатов экспериментальных исследований сенсомоторных серийных действий. Современные работы рассмотрены по трём направлениям – поведенческое, нейрофизиологическое и моделирующее. В поведенческом направлении выделяются три «господствующие» экспериментальные парадигмы: быстрая печать набора стимулов (обычно – слов); 2×N (последовательности из нескольких парных стимулов); время серийных реакций (SRT); заучивание дискретных стимульных рядов (DSP); заучивание дискретных и непрерывных движений при отслеживании заданных маршрутов. Приведены некоторые нейрофизиологические данные, согласующиеся с данными поведенческих экспериментов. Кратко изложены основные составляющие и свойства одной из последних моделей серийного поведения – N-STREAMS. Отмечается, что результаты отечественных (хотя и немногочисленных) исследований сенсомоторных серийных действий во многом согласуются с данными зарубежных авторов.

Ключевые слова: *серийные действия, сенсомоторный навык, научение, сегментация последовательности, антиципация, позиционный эффект, серийные реакции, время реакции, слежение.*

Наше повседневное поведение складывается из последовательности отдельных действий. Действия состоят из последовательности отдельных операций. Мы познаём мир фрагмент за фрагментом, из которых формируется его целостный образ. Как из парциальных действий возникают целостные образования, регулирующие в последующем пространственно-временную развёртку этих действий, – вопрос, который был обозначен ещё Карлом Лэшли (Lashley, 1951), но ответ на который до сих пор пребывает в стадии поиска. В экспериментальной психологии этот поиск ведётся в контексте исследований *серийных действий*. К последним совершенно справедливо относят не только сенсомоторику, но и многие другие виды активности, которые реализуются в виде временной последовательности различных, в том числе перцептивных и вообще умственных операций. На протяжении последних 30 лет теме серийных действий было посвящено немало зарубежных работ, содержательный обзор которых дан в недавней статье Rhodes и др. (2003). Остановимся на основных её разделах.

В настоящее время сформировались три дополняющих друг друга направления исследований серийных действий: поведенческое, нейрофизиологическое и моделирующее. Рассмотрим только те из них, в которых испытуемым предлагалось выполнять задачи с участием ручных движений.

В работах поведенческого направления изучаются условия, влияющие на процессы заучивания и последующего воспроизведения последовательности сенсомоторных операций. Начиная с работ Sternberg и др. (1978; 1980), наиболее типичной здесь стала парадигма, в которой испытуемые должны были быстро напечатать на клавиатуре несколько слов. Главной независимой переменной была длина последовательности (2–6 слов). С момента предъявления последовательности начинался обратный отсчёт времени, по истечении которого следовал сигнал, разрешающий печать. В качестве зависимых переменных служили ВР (время реакции от разрешающего сигнала до первого нажатия клавиши на клавиатуре) и ИН (временной интервал между двумя последовательными нажатиями). Были обнаружены,

в частности, следующие эффекты: 1) ВР возрастало линейно с увеличением длины последовательности; 2) средний ИН (показатель, обратный скорости печатания всей последовательности) возрастал при увеличении длины последовательности; 3) отношение ВР / ИН было значительно больше единицы; 4) наименьшим всегда был последний ИН. В последующих работах других авторов (Salhouse, 1986; Klapp, 1995; Verwey, 1996) было показано, что эти эффекты постепенно ослабевают или исчезают совсем по мере тренировки испытуемых, когда вначале незнакомые им последовательности становятся хорошо знакомыми. Всё это позволило поставить под сомнение традиционное представление об ассоциативном механизме регуляции серийных действий, согласно которому очередное действие запускается сигналом об окончании предыдущего: ведь в этом случае упомянутых эффектов не должно было бы быть. Вместе с тем возникла новая проблема: как представлено в опыте субъекта знание о целостной последовательности, на основе которого регулируется её поэлементная развёртка во времени?

Дополнительные подтверждения тому, что при усвоении незнакомой последовательности в опыте субъекта появляются новообразования, которые нельзя объяснить только закреплением связей между двумя соседними её элементами, были получены в экспериментах, которые проводились по схеме $2 \times N$. (Nikosaka et al., 1996). Суть этой парадигмы заключается в следующем. Испытуемый работает с набором кнопок, расположенных в виде матрицы, например, 4×4 . Вначале он нажимает стартовую кнопку, после чего подсвечиваются только две кнопки этой матрицы (отсюда – первое обозначение в упомянутой выше схеме). Задача испытуемого – последовательно нажать эти кнопки в определённом порядке, который заранее ему не известен. Если он ошибся (в этом случае кнопки продолжают оставаться подсвеченными), он должен возвратиться к стартовой кнопке и начать новую пробу. Если пара кнопок активирована испытуемым в правильном порядке, они гаснут, после чего включается подсвет следующей пары. Всего таких упорядоченных пар может быть N (обычно $N = 10$). Последовательность в паре обозначается как «сэт», а вся последовательность объёмом N – как «гиперсэт». Обычно критерием усвоения гиперсэта считается его безошибочное воспроизведение 10 раз подряд. Зависимыми переменными в этой схеме являются количество проб, необходимых для первого безошибочного исполнения гиперсэта, и средняя скорость исполнения (величина, обратная временному интервалу между нажатиями стартовой и последней кнопок в сэте).

Парадигма $2 \times N$ с её различными модификациями позволяет изучать различные аспекты серийных действий, начиная с обнаружения испытуемым порядка чередования элементов последовательности и кончая безошибочным её исполнением. В частности, были обнаружены следующие закономерности. 1. Если среди предъявленных гиперсэтов были как ранее хорошо заученные, так и новые, то скорость исполнения первых была значительно выше, по сравнению с новыми, даже если повторное исполнение проходило спустя 6 месяцев; при этом, количество ошибок для старых и новых гиперсэтов было примерно одинаковым. Это говорит о том, что запоминание порядка чередования элементов последовательности не зависит от запоминания скорости исполнения (Nikosaka et al., 1995:). 2. В ходе тренировки изменяется характер движений глаз испытуемого: среди них появляются антиципирующие саккады, фиксирующие правильные, но ещё не подсвеченные кнопки. Таких саккад становилось всё больше в процессе повторения заученной последовательности. То же самое было характерно и для движений руки, когда палец останавливался над кнопкой, которая должна была вот-вот высветиться (Miyashita et al., 1996). 3. Во время заучивания

гиперсэта часто наблюдается его спонтанная сегментация, когда после исполнения двух или более сэтов возникает небольшая временная пауза. Объём таких сегментов (shunks), их количество и характер распределения по всему гиперсэту не зависят от физических свойств последовательности и индивидуальны для каждого испытуемого (Sakai et al., 2003). О фрагментации серийных движений, состоящих из разнонаправленных сегментов, упоминается также в недавней работе Agam и др. (2007).

Начиная со второй половины прошлого века и по сей день (Bahrick et al., 1954; Nissen, Bullemer, 1987; Remillard, 2008) одной из самых популярных в экспериментальных исследованиях сенсомоторики была и остаётся методика измерения времени серийных реакций (serial reaction time, SRT). В отличие от времени простой реакции (simple reaction time, sRT) или времени реакции выбора (choice reaction time, cRT) в этой парадигме испытуемым предъявляются последовательности, состоящие из блоков по несколько (от 3 до 8) стимулов; в одних блоках стимулы чередуются в определённом порядке, в других – случайно; в непосредственной близости от каждого стимула располагается соответствующая ему реактивная кнопка (при удалённом расположении реактивных кнопок обычно соблюдается правило совместимости). Испытуемый должен как можно скорее нажимать на кнопку после подсветки соответствующего ей стимула. Через 200 мс после нажатия кнопки предъявляется следующий стимул. В процессе эксперимента многократно повторяется одна и та же последовательность и измеряется ВР на каждый стимул. Основной факт состоит в том, что, начиная с определённого количества повторений всей последовательности, ВР на стимулы из регулярных блоков становятся меньше, по сравнению со случайными блоками, и это различие возрастает по мере повторного исполнения последовательности. При этом, даже несмотря на явное ускорение исполнения в конце тренировки, испытуемые, как правило, не осознают наличия регулярного чередования, хотя у некоторых такое осознание имеет место. В связи с этим возникла проблема соотношения имплицитного (= неосознаваемого) и эксплицитного (= осознаваемого) научения в сенсомоторных действиях. Для её решения разрабатывались различные методики, позволяющие выявлять наличие того или иного вида научения на различных этапах исполнения (Destrebecqz, Cleeremans, 2001). Вообще следует отметить, что для последних работ с применением парадигмы SRT характерно всё возрастающее внимание к когнитивным аспектам сенсомоторики, которые оказываются очень похожими на изучаемые в когнитивной психологии свойства восприятия, внимания, памяти, порождения высказывания. Позиционные эффекты, возникающие в процессе усвоения последовательности, группирование нескольких коротких последовательностей в более крупные структурные единицы, влияние длины последовательности на ВР, влияние сужения поля зрения на скорость печатания, – вот лишь некоторые примеры сопряжения сенсомоторики с общепсихологической тематикой (см. также Clark, Ivry, 2010).

Ещё более высокий уровень такого сопряжения характерен для теоретических моделей управления серийными действиями, большинство из которых основано на принципе иерархического контроля. Эти модели можно рассматривать как поведенческое расширение бернштейновской модели построения движений. Согласно Broadbent (1977), следует различать два типа иерархии. Для первого типа характерно наличие одного процессора, которому подчинена вся иерархическая репрезентация (см., напр., Rosenbaum et al., 1984); такая модель применима к относительно незнакомым последовательностям. В моделях второго типа постулируется наличие нескольких процессоров, параллельно работающих на разных уровнях репрезентации

последовательности (см., напр., Verwey, 2003). Низкоуровневые сегменты иерархии функционируют под контролем исполнительного моторного процессора, в то время как высокоуровневый процессор подготавливает к работе очередные сегменты, отвечая тем самым за их последовательное включение. Различные процессоры могут конкурировать за активацию каждого из последующих элементов последовательности. В зависимости от степени тренированности, некоторые процессоры могут оказаться более успешными в этом соревновании, в результате чего доминирующими окажутся специфические коды (например, пространственный или моторный). Формирование множественных репрезентаций в процессе тренировки типично для таких навыков, как письмо, речь, печатание и др. Существуют достаточно весомые основания признать, что в ходе тренировки в исполнении серийных действий репрезентации последовательности образуются на разных уровнях, что позволяет быстро настроить выполняемое движение под эти репрезентации и другие ресурсы обработки информации, такие как внимание и рабочая память.

Как отмечают Rhodes и др. (2003), наиболее подходящей для изучения внутренних процессов при заучивании последовательностей (предваряющей готовности, иерархической динамики, фрагментации последовательности) является парадигма дискретного развёртывания последовательности (Discrete sequence production, DSP). Объём дискретов в ней ограничен 6-8 элементами, причём, порядок чередования элементов внутри разных дискретов может быть неодинаковым. В отличие от методики SRT, реактивные кнопки, соответствующие тому или иному элементу, указываются здесь сразу после выполнения ответа (то есть после отжатия кнопки текущего реагирования), а не через 200 мс; кроме того, количество повторений последовательности увеличено до 500 (по сравнению с 80-100 в методике SRT). В ряде работ с применением методики DSP было показано, что в ходе интенсивной тренировки у испытуемых вырабатывается целостное представление о всей последовательности, в связи с чем исчезает позиционный эффект (разное время реагирования на разные элементы последовательности) и появляется всё больше антиципирующих реакций. Интересно, что хотя большинство испытуемых в конце тренировки знали, что они имели дело с несколькими фиксированными последовательностями, всегда было несколько таких, которые не могли сказать, какую из них они воспроизвели только что, причём, не хуже тех, которые давали правильный отчёт.

Начиная с 2000 г. поведенческие исследования серийных действий стали более экологичными благодаря использованию в экспериментах задач с дискретным или непрерывным слежением. Остановимся на наиболее интересных работах.

Bird и др. (2005), анализируя работы ряда авторов, выделяют несколько способов приобретения знания о последовательности. Можно реагировать (точнее, реагировать движением) на последовательно предъявляемые стимулы, или только наблюдать последовательности без реагирования на стимулы, или наблюдать, как кто-то другой реагирует на последовательность. Какие процессы опосредуют усвоение последовательности в этих разных условиях? В стандартных задачах на время реакции (ЗВР) испытуемый усваивает стимульную последовательность на основе собственных действий. В каждой пробе стимул появляется на разных местах экрана компьютера, а испытуемый должен нажимать на соответствующую кнопку как можно быстрее. Стимул появляется в соответствии с предсказуемой последовательностью в течение многих тренировочных циклов. Объективным показателем знания последовательности является увеличение ВР, когда в тестовой пробе происходит неожиданное изменение в последовательности. Как было показано во многих работах, *действенное* научение в

задачах ЗВР может быть имплицитным, то есть сама последовательность может не осознаваться. Например, когда в тесте на узнавание испытуемые быстрее реагировали на фрагменты знакомой последовательности, чем фрагменты незнакомой, то первые не оценивались ими как более знакомые, чем вторые (Exner et al., 2002; Kelly, Burton, 2001)

В другом варианте ЗВР испытуемые только наблюдают за предъявляемой последовательностью, но во время тренировочного сеанса не реагируют на стимулы. В этом случае последовательность усваивается эксплицитно, то есть это невозможно без осознанного знания о ней (Kelly et al., 2003; Willingham, 1999). Например, в работе Howard и др. (1992) сравнивались показатели для наблюдающей и действующей групп, которые тестировались в условиях как ЗВР, так и при свободном генерировании последовательности (то есть при отсутствии каких-либо стимулов). У обеих групп показатели были одинаковыми. Успешное воспроизведение тренировочных последовательностей наблюдающей группой свидетельствовало о том, что их знания были эксплицитными.

Kelly и др. (2003) полагают, что для имплицитного научения необходимо действие (двигательное). Эта гипотеза согласуется с недавней концепцией формирования двигательных навыков (Hikosaka et al., 2002), согласно которой в нём параллельно участвуют два процесса. Первому требуется двигательная информация, которая не представлена в сознании, то есть является имплицитной. Второй процесс опосредует усвоение пространственной информации, которая представлена эксплицитно. Таким образом, имплицитное научение связано исключительно с моторикой, или, как говорит Келли "с научением через действие" (learning by action). Другой точки зрения придерживаются Agam и др. (2007), которые показали, что при определённых условиях одно только восприятие будущей траектории, без её реальной имитации достаточно для успешного научения.

Здесь есть ещё один интересный момент. При наблюдении действий *другого* происходит скрытая их имитация наблюдающим. Она как бы подготавливает его к будущему исполнению. В результате такого скрытого моторного "прайминга" может оказаться, что наблюдение за действиями другого в ситуации ЗВР будет более похожим на действенное научение, чем научение путём одного наблюдения последовательности. О том, что такого рода моторный прайминг при наблюдении действий другого действительно имеет место, свидетельствуют данные картирования мозговой активности, которые служат одним из оснований признать существование *зеркальных нейронов* (подробнее о них см.: Rizzolatti, Craighero, 2009).

Bird и др. (2005) полагают, что заучивание длинных и сложных последовательностей происходит неосознанно (имплицитно), а коротких и простых – скорее всего осознанно (эксплицитно). Это проверялось в эксперименте с разными группами испытуемых: группа А – собственные двигательные реакции в ответ на последовательность стимулов; группа SO – наблюдение только стимульной последовательности; группа АО – наблюдение действий эксперта и стимульной последовательности; группа АОО – наблюдение только действий эксперта без восприятия стимульной последовательности; группа С – контрольная (во время тренировочного сеанса решала анаграммы). Во время тренировки на экране располагались по горизонтали 4 квадрата, внутри которых появлялась стрелка. Как только испытуемый замечал стрелку, он должен был нажать соответствующую клавишу. Квадратам 1, 2, 3, 4 (слева направо) соответствовали клавиши V, B, N, M. Пример длинной последовательности из 12 единиц: 2-4-2-1-3-4-1-2-3-1-4-3. При послетренировочном тестировании испытуемым предъявлялись как те

последовательности, которые применялись во время тренировочного обучения, так и другие, ранее не применявшиеся. В случае простой последовательности различия между группами АО и SO, измерявшиеся по величине прироста ВР в тестовых пробах, практически отсутствовали. В группе АОО прирост ВР имел место, что указывало на усвоение ими тренировочной последовательности, но субъективные оценки ими знакомости старых и новых последовательностей практически были одинаковыми. Это указывает на имплицитный характер усвоения тренировочной последовательности даже в условиях, когда испытуемый не видит предъявляемых стимулов, а только наблюдает за действиями другого.

Теме о соотношении между эксплицитной (декларативной) и имплицитной (процедурной) репрезентациями заучиваемых последовательностей посвящена также работа, в которой применялась задача непрерывного двухмерного слежения за курсором, движущимся на экране монитора по определённой траектории (Philip et al., 2008). Создавались следующие экспериментальные условия:

1. *"Новые"*. Отслеживание траекторий, состоящих из цепочки 6 разнонаправленных сегментов одинаковой длины (эксплицитная репрезентация). В каждой из 50 проб предъявлялась новая траектория. В конце каждой пробы испытуемый получал информацию о среднеквадратичной ошибке по положению в виде её численного выражения.

2. *"Воспроизведение"*. Блок из 20 идентичных проб, в которых цель перемещалась по последней из траекторий предыдущего условия. Через 0,5 с после начала движения цели она становилась невидимой, и испытуемый должен был отслеживать её траекторию по памяти (имплицитная репрезентация). Цель снова становилась видимой за 0,5 с до окончания её движения. Испытуемые не получали информации о величине ошибки.

3. *"Повторение"*. Блок из 100 повторений одной и той же траектории. В конце каждой пробы испытуемые получали информацию о величине ошибки.

4. *"Повторное воспроизведение"*. Блок из 20 повторений одной и той же траектории с отключением цели аналогично условию 2. Информацию об ошибке испытуемые не получали.

5. *"Тест"*. Блок из 50 проб. Каждая проба состояла из траектории, содержащей до 18 сегментов. В её начале и конце следовало случайное число новых сегментов (от 2 до 10), а в середине находились 6 сегментов знакомой траектории, которая применялась в условии 3. Никаких внешних признаков перехода от новых сегментов к старым и наоборот не было, но испытуемые знали, что в каждой пробе будет встречаться знакомая траектория. Лево́й рукой испытуемые нажимали на ключ в тот момент, когда они чувствовали, что начинается или заканчивается знакомая траектория. После каждой пробы испытуемый оценивал степень своей уверенности в правильности распознавания знакомой траектории по 10-балльной шкале.

Примечательной особенностью этой работы стало применение авторами вычислительных методов, позволяющих отделить характеристики исполнения под зрительным контролем от характеристик исполнения под зрительным и внутренним (на основе образа памяти) контролем. Авторам удалось показать также, что объективно сенсомоторная система начинает реагировать на переход от знакомого маршрута к незнакомому (или наоборот) раньше, чем испытуемый осознаёт факт такого перехода. В данной экспериментальной ситуации осознание запаздывало в среднем на 800 мс.

Из работ нейрофизиологического направления остановимся на одной из них (Averbeck et al., 2003a, b), в которой представлен материал, подтверждающий рассмотренные выше данные поведенческих экспериментов. Обезьян тренировали

рисовать ряд геометрических фигур – треугольник, квадрат, трапецию и перевернутый треугольник. В начале пробы обезьяна удерживала управляемый джойстиком курсор на стартовой позиции в течение 1 с. Затем на светлой половине экрана экспонировалась статическая эталонная фигура. Обезьяна могла рисовать на левой половине экрана. Если она полностью вырисовывала заданную траекторию, перемещая курсор по невидимому "коридору", который очерчивал приемлемую форму, она получала порцию виноградного сока. Фигуры предъявлялись блоками, каждый блок состоял из нескольких повторов одной и той же фигуры. Эта регулярность, а также секундная стартовая пауза позволяли обезьяне антиципировать, подготовиться к рисованию фигуры, которая будет предъявлена в следующей пробе (во всех пробах, кроме первой пробы в блоке). Анализ профилей ускорений в движениях руки обезьяны показал, что вся их траектория делится на ряд сегментов, которые соответствуют сторонам рисуемой фигуры. Другими словами, непрерывная траектория состоит из последовательности отдельных сегментов. Не менее интересным оказалось регистрируемое во время эксперимента поведение отдельных групп нейронов префронтальной коры головного мозга обезьяны (см. рис. 1).

За 500 мс до выполнения движений формировался определённый паттерн активности этих групп, в котором выделялся один максимум, соответствующий первому сегменту фигуры. Во время рисования при переходе к следующему фрагменту максимально активной становилась другая группа нейронов, а активность первой затухала. Такое перемещение максимума по профилю активности, представленному несколькими параллельно протекающими процессами, наблюдается на всём протяжении выполнения последовательности движений. Если соотнести эти данные с понятием *нервной модели стимула* (Е.Н. Соколов), то можно говорить о существовании *динамического* варианта этой модели, в которой репрезентирован не только стимул, но и порядок направленных на него действий.

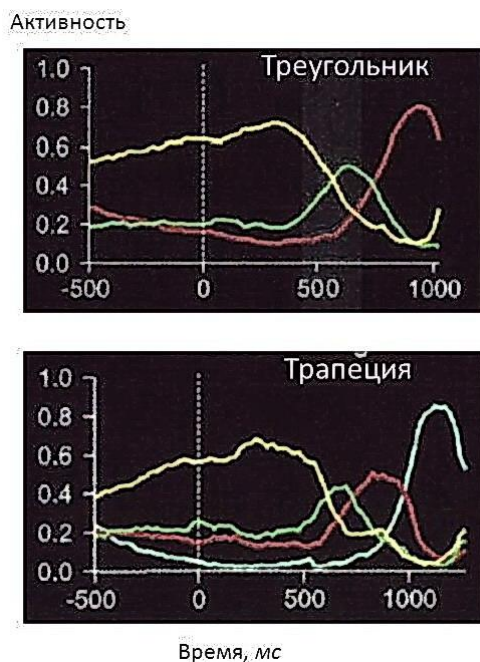


Рис. 1. Уровни репрезентации (активации) сегментов различных фигур в нейронных ансамблях префронтальной коры головного мозга обезьяны (с сокращениями, по: Averbek et al., 2002). Нулевая отметка на оси времени соответствует моменту предъявления эталонной фигуры. Видна параллельная репрезентация сегментов перед началом их рисования. Ранговый порядок

интенсивности репрезентаций (шкала "Активность") соответствует очередности рисования сегментов

Каковы нервные механизмы *временной организации* серийных действий? В работе Hazeltine и др., (1997) анализировались несколько гипотез, проверившихся на материале двигательных действий. 1) Вариативность временной развёртки серийных движений обусловлена вкладами двух *независимых* подсистем: одна из них (задающая) генерирует временную последовательность, другая (исполнительная) реализует эту последовательность, превращая её в движение; чтобы определить каждый из этих вкладов, была предложена модель Wing-Kristofferson (1980), основанная на хорошо известном факте о росте временной вариативности с увеличением длительности сегмента двигательной последовательности. 2) Восприятие и исполнение обслуживаются *одним общим* механизмом отсчёта времени (Ivry, Hazeltine, 1995; Keele, и др., 1985); он может быть расположен в мозжечке, в нервной сети которого временная информация преобразуется в пространственную (Buonomano, Mauk, 1994; Buonomano, Merzenich, 1995). 3) Механизмы временной регуляции серийных действий распределены по всему мозгу, но разные его отделы оказывают своё специфическое влияние (O'Boyle, et al., 1996; Gibbon, Church, 1990).

Что касается моделей серийных действий, то среди большого их разнообразия, ограниченного, впрочем, применимостью к сугубо частным задачам, следует выделить модель, названную N-STREAMS (сокращение по первым буквам Neural Substrates That Rehearse, Encode, And Memorize Sequences) (Rhodes et al., 2003). Она согласуется со многими экспериментальными данными и другими частными моделями, объясняя временную динамику серийного поведения не только в начале, но и в конце заучивания последовательностей. К основным эффектам, демонстрируемым этой моделью, относятся: 1) влияние длины последовательности на латентность; 2) соотношение между длинным латентным периодом и следующими за ним гораздо более короткими интервалами между ответными реакциями на неначальные элементы последовательности, выполняемой при двух условиях: или при наличии предварительного знания о новой последовательности и возможности подготовиться к её выполнению, или после достаточно интенсивной тренировки; 3) влияние длины последовательности на среднюю скорость исполнения не исчезает по мере тренировки; 4) позиционная зависимость межответного интервала исчезает после продолжительной тренировки. Модель состоит из следующих модульных блоков: 1) передне-лобный отдел коры, обеспечивающий градиентную репрезентацию порядка исполнения последовательности; 2) механизм рабочей памяти, который выделяет подходящий градиент в потоке входных сигналов, репрезентирующих последовательность, а также сравнивает последовательности, извлечённые из долговременной памяти, с текущей репрезентацией, созданной на основе внешне-стимульной презентации; 3) блок сжатого кодирования последовательности, заученной на корковом уровне; сжатое кодирование (*compressive chunk encoding*) позволяет удерживать в памяти небольшие фрагментарные последовательности элементов и облегчает их воспроизведение в целях исполнения или опознания; 4) мозжечковый модуль, на уровне которого заучиваются как фрагментированные последовательности, так и межответные переходы. Благодаря градиентной репрезентации относительная активация праймовых элементов служит своего рода имплицитным кодом для серийного порядка. В процессе тренировки мозжечковый уровень научения приобретает способность антиципировать и заранее загружать подходящий градиент в более медленный буфер лобной коры, а также ускорять исполнение отдельных ответных реакций внутри их последовательности. Эти

и другие компоненты модели вполне соотносимы с нейроанатомическими данными и с большинством результатов современных нейрофизиологических, клинических исследований, включая картирование мозга, полученных в экспериментах с научением серийным действиям. В модели N-STREAMS особо подчеркнута функциональное значение нервных связей между глубоким мозжечковым ядром и лобной корой, идущих через моторный таламус.

* * *

Хотя российских работ, связанных с серийными действиями, очень мало, уже в их самом начале, относящемся к концу 50-х годов 20-го века, мы встречаем в них констатацию двух основных свойств усвоения последовательности сенсомоторных операций – образование целостных фрагментов, состоящих из нескольких элементов последовательности (аналог упомянутого выше сжатого кодирования), и не всегда осознанный (имплицитный, по современной терминологии) характер формирования заученной последовательности. Вместе с тем, в этих работах можно найти и специфическую тематику. Так, в экспериментах Бойко (они описаны в более позднем издании его трудов, вышедшем в 2002 г.) испытуемые должны были заучивать неизвестные им связи между сигнальными лампочками, расположенными в виде матрицы 4x4 на вертикальной панели, и реактивными ключами, расположенными в таком же виде на горизонтальной панели. При нажатии испытуемым каждого ключа загорается только одна из лампочек. Комбинируя связи между лампочками и ключами, можно было ставить перед испытуемым такие задачи, которые решаются только при условии выполнения определённых *умственных* операций. Например, вначале заучивались связи между горизонтальными рядами лампочек и ключей, затем – такие же связи между вертикальными рядами. Хитрость эксперимента заключалась в том, что испытуемые не знали поэлементных связей между данным ключом и соответствующей ему лампочкой, то есть после заучивания они знали, что данная лампочка загорается при нажатии ключа, расположенного, скажем, в 1-м ряду, но не знали, какой именно ключ этого ряда зажигает эту лампочку. Когда после упомянутого заучивания связей между рядами перед ними ставилась именно такая задача – нажать тот ключ, который зажигает указанную экспериментатором лампочку – после некоторого раздумья они правильно решали её. Здесь требовалось соотнести в уме знания о двух последовательностях – вертикальной и горизонтальной, поскольку целевая лампочка располагалась в месте их пересечения. Бойко заключает: "Процесс решения во всех своих частях, казалось бы, состоит из одних лишь репродуктивных актов..., но связная цепь этих актов, как целое, приводит к качественно *новому* содержанию, к конкретному ответу на задачу, то есть приобретает черты продуктивного (умственного) процесса" (Бойко, 2002, с.477).

Из современных работ по серийным действиям отметим ряд интересных экспериментов, выполненных Т.В. Ахутиной и др. (1998), Н.Д. Гордеевой с сотрудниками (1995), а также А.А. Корнеевым и А.В. Курганским (2011, 2013). В отличие от зарубежных "кнопочных" парадигм в этих экспериментах испытуемые совершали инструментальные ручные движения, выполняемые путём перемещения либо рукоятки трёхстепенного органа управления, либо пера электронного планшета.

В экспериментах Гордеевой испытуемым на телевизионном экране предъявлялись траектории разной сложности, которые нужно было отследить быстро и как можно точнее. Микроструктурный анализ выполнения такого рода задач показал, что разные стадии парциальных движений, образующих целостную траекторию, неодинаково

чувствительны к её усложнению. Наиболее чувствительной оказалась конечная стадия корригирования, время которой возрастало при усложнении траектории, тогда как начальная латентная стадия оставалась практически неизменной. По мере выработки навыка отслеживания сложного маршрута, когда резко выраженная дискретность движения по маршруту сменялась единым плавным движением, время латентной стадии существенно возрастало, причём чем сложнее был маршрут, тем больше был рост. Оказалось также, что вся последовательность парциальных движений состояла из нескольких групп. Их число увеличивалось вместе с удлинением маршрута, а латентное время первого движения в группе было больше, чем у остальных компонентов этой группы. Эти результаты обсуждаются с точки зрения соотношения программирующей и исполнительской фаз серийных действий. К аналогичному выводу несколько позже приходили и некоторые зарубежные психологи (Sidaway, Yook, 1999). Они предлагали испытуемым быстрыми движениями последовательно попадать в цели, расположенные в разных местах экрана; в одном случае испытуемые начинали это делать самопроизвольно, в другом – по внешнему сигналу. В последнем случае 2-й сегмент движения выполнялся значительно медленнее, чем предыдущий и последующий. Такой временной паттерн сегментарных движений сохранялся как при наличии, так и при отсутствии зрительной обратной связи. Но этот эффект отсутствовал, когда испытуемые начинали действие самопроизвольно (по-видимому, планируя всю последовательность движений до их исполнения). Это даёт основание заключить, что программирование быстрой последовательности точностных движений может быть распределено на интервалах времени до и после начала действия.

В экспериментах Корнеева и Курганского (2013) испытуемым предъявлялись простые фигуры из 6 сегментов – вертикальных и горизонтальных линий, – что обеспечивало их хорошее воспроизведение в различных условиях экспозиции всего маршрута. Нужно было отследить траекторию фигуры курсором, который управлялся перемещением магнитного пера в плоскости планшета, а затем воспроизвести тем же способом маршрут движения. Эталонные маршруты предъявлялись либо статически (в виде нарисованной фигуры), либо динамически (в виде движения целевого маркера). Варьировались также времена задержки воспроизведения (до 3 сек.). В одной из серий эксперимента порядок воспроизведения фрагментов менялся на обратный, по сравнению с порядком их отслеживания. Измерялось латентное время воспроизведения (RT, оно начиналось после внешнего сигнала), времена движения по отдельным сегментам и времена остановок в точках изменения направления. Авторы обсуждают полученные результаты в контексте вопроса о характере нейронных кодов (перцептивном, абстрактном или моторном), используемых для внутренней репрезентации элементов последовательности движений в ЦНС.

Заключение

В исследованиях сенсомоторных серийных действий сложилась ситуация, аналогичная в иных областях экспериментальной психологии, когда два направления – поведенческое и нейрофизиологическое – идут разными, но параллельными путями к общей цели – раскрытию тайн психофизического взаимодействия. Но всё дело в том, что даже на участках уже пройденного пути между этими параллелями зияет пропасть незнания. Поведенческие данные рано или поздно находят подтверждение в данных психофизиологических, но остаются неясными те конкретные процессы, которые реализуют *переход* от антиципирующего образа действия к активации соответствующего ему, по выражению Н.А.Бернштейна, "сервомеханизма". Деление

знания на имплицитное (неосознанное) и эксплицитное (осознанное) уже стало триумфом. Необходимо перейти к изучению взаимодействия того и другого на всех уровнях сенсомоторной иерархии, причём, не ограничиваясь только наблюдаемыми вкладами процессов торможения и возбуждения нейронных ансамблей, а выясняя всю стоящую за ними цепочку причинно-следственных связей (подробнее см. Назаров, 2009). Конечно, для решения этой задачи необходимо создать новое аппаратно-программное обеспечение и тип экспериментов, в которых проблемы психофизиологических переходов решались бы с помощью изначально разработанных для этого методик.

Литература:

1. Ахутина Т.В., Кричевец А.Н., Курганский А.Н. О временной организации серийных движений // *Вестн. Моск. ун-та. Сер.14. Психология*, 1998, №1, с. 32-40.
2. Бернштейн Н.А. Физиология движений и активность. – М.: Наука. 1990.
3. Бойко Е.И. Механизмы умственной деятельности. Избранные психологические труды / Под редакцией А.В. Брушлинского и Т.Н. Ушаковой. – М.: Московский психолого-социальный институт, Воронеж: НПО "МОДЭК", 2002, с. 472-477.
4. Гордеева Н.Д. Экспериментальная психология исполнительного действия. М.: Тривола, 1995, с. 133-142.
5. Корнеев А.А., Курганский А.В. Воспроизведение траектории движения, заданной зрительным образцом: зависимость от способа предъявления и сложности траектории // *Материалы конференции «Когнитивная наука в Москве: новые исследования»*, Москва, 16 июня 2011, с. 144-149.
6. Корнеев А.А., Курганский А.В., Внутренняя репрезентация серии движений при воспроизведении статического рисунка и траектории движущегося объекта // *Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова*, 2013, №4, с. 437-450.
7. Назаров А.И. От рефлекторного кольца к многосвязной системе // *Методология и история психологии. История психологии*, 2009, т.4, вып.2, с. 32-44.
8. Agam Y., Galperin H., Gold B. J., Sekuler R. Learning to imitate novel motion sequences // *Journal of Vision*, 2007, vol. 7(5), pp. 1–17.
9. Averbek, B.B., Chafee, M.V., Crowe, D.A., Georgopoulos, A.P. Neural activity in prefrontal cortex during copying geometrical shapes. I. Single cell studies // *Experimental Brain Research*, 2003a, vol. 150, pp. 127-141.
10. Averbek, B.B., Crowe, D.A., Chafee, M.V., Georgopoulos, A.P. Neural activity in macaque prefrontal cortex during copying geometrical shapes. II. Decoding shape segments from neural ensembles // *Experimental Brain Research*, 2003b, vol. 150, pp. 142-53.
11. Bahrack, H.P., Noble, M., Fitts, P.M. Extra-task performance as a measure of learning a primary task // *Journal of Experimental Psychology*, 1954, vol. 48, pp. 298-302.
12. Bird, G., Osman M., Saggerson A., Heyes C. Sequence learning by action, observation and action observation // *British Journal of Psychology*, 2005, vol. 96, pp. 371–388.
13. Broadbent, D.E. Levels, hierarchies, and the locus of control // *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 1977, vol. 29, pp.181-201.
14. Buonomano, D.V., Mauk, M.D. Neural network model of the cerebellum // *Neural Computation*, 1994, vol. 6, pp. 38-55.

15. Buonomano, D.V., Merzenich, M.M. Temporal information transformed into a spatial code by a neural network with realistic properties // *Science*, 1995, vol. 267, pp. 1028-1030.
16. Clark D., Ivry R.B. Multiple systems for motor skill learning // *WIREs Cognitive Science*, 2010, wires.wiley.com/cogsci
17. Destrebecqz, A., Cleeremans, A. Can sequence learning be implicit? New evidence with the process dissociation procedure // *Psychonomic Bulletin and Review*, 2001, vol. 8, pp. 343-350.
18. Exner, C., Koschack, J., Irlle, E. The differential role of premotor frontal cortex and basal ganglia in motor sequence learning: Evidence from focal basal ganglia lesions // *Learning and Memory*, 2002, vol. 9(6), pp. 376-386.
19. Gibbon, J., Church, R.M. Representation of time // *Cognition*, 1990, vol. 37, pp. 23-51.
20. Glover S. Separate visual representations in the planning and control of action // *Behavioral and brain sciences*, 2004, vol. 27, pp. 3-78.
21. Hazeltine, E., Helmuth, L. L., Ivry, R. Neural mechanisms of timing // *Trends in Cognitive Sciences*, 1997, vol.1, pp.163-169.
22. Hikosaka, O., Rand, M.K., Miyaehi, S., Miyashita, K. Learning of sequential movements in the monkey: Process of learning and retention of memory // *Journal of Neurophysiology*, 1995, vol. 74, pp. 1652-1661.
23. Hikosaka, O., Sakai, K., Miyauchi, S., Takino, R., Sasaki, Y., Putz, B. Activation of human prcsupplementary motor area in learning of sequential procedures: a functional MR1 study // *Journal of Neurophysiology*, 1996, vol. 76, pp. 617-621.
24. Hikosaka, O., Nakamura, K., Sakai, K., Nakahara, H. Central mechanisms of motor skill learning // *Current Opinion in Neurobiology*, 2002, vol. 12(2), pp. 217-222.
25. Howard, J.H., Mutter, S.A., Howard, D.V. Serial Pattern Learning by Event Observation // *Journal of Experimental Psychology-Learning Memory and Cognition*, 1992, vol. 18(5), pp. 1029-1039.
26. Ivry, R., Hazeltine, R.E. Perception and production of temporal intervals across a range of durations: Evidence for a common timing mechanism // *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 1995, vol. 21, pp. 3-18.
27. Keele, S., Pokorny, R., Corcos, D., et al. Do perception and motor production share a common timing mechanism? // *Acta Psychologica*, 1985, vol. 60, pp. 173-193.
28. Kelly, S.W., Burton, A.M. Learning complex sequences: No role for observation? // *Psychological Research-Psychologische Forschung*, 2001, vol. 65(1), pp. 15-23.
29. Kelly, S.W., Burton, A.M., Riedel, B., Lynch, E. Sequence learning by action and observation: Evidence for separate mechanisms // *British Journal of Psychology*, 2003, vol. 94, pp. 355-372.
30. Klapp, S.T. Motor response programming during simple and choice reaction time: The role of practice // *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 1995, vol. 21, pp. 1015-1027.
31. Klapp, S.T. Reaction time analysis of central motor control / In H. Zelaznik (Ed.), *Advances in Motor Learning and Control*. Champaign, IL: Human Kinetics Press, 1996.
32. Lashley, K. The problem of serial order in behavior / L.A. Jefress (ed.) *Cerebral Mechanisms in Behavior*. – N.Y., Wiley, 1951.

33. Miyashita, K., Rand, M.K., Miyachi, S., Hikosaka, O. Anticipatory saccades in sequential procedural learning in monkeys // *Journal of Neurophysiology*, 1996, vol. 76, pp. 1361-1366.
34. Nissen, M.J., Bullemer, P. Attentional requirements of learning: Evidence from performance measures // *Cognitive Psychology*, 1987, vol. 19, pp. 1-32.
35. O'Boyle, D.J., Freeman, J.S., Cody, F.W.J. The accuracy and precision of timing of self-paced, repetitive movements in subjects with Parkinson's disease // *Brain*, 1996, vol. 119, pp. 51-70.
36. Philip, B.A., Wu, Y., Donoghue, J.P., Sanes, J.N. Performance differences in visually and internally guided continuous manual tracking movements // *Experimental Brain Research*, 2008, vol. 190, pp.475–491.
37. Remillard G. Implicit learning of second-, third-, and fourth-order adjacent and nonadjacent sequential dependencies // *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 2008, vol. 61(3), pp. 400–424.
38. Rhodes B., Bullock D., Verwey W., Averbeck B., Page M. Learning and production of movement sequences: Behavioral, neurophysiological, and modeling perspectives // *Human movement science*, 2003, vol. 5, pp.1-73.
39. Rizzolatti G., Craighero L. The mirror-neuron system // *Arch. Neurol.*, 2009, vol. 66(5), pp. 557-60.
40. Rosenbaum, D.A., Inhoff, A.W., Gordon. A.M. Choosing between movement sequences: A hierarchical editor model // *Journal of Experimental Psychology: General*, 1984, vol. 113, pp. 372-393.
41. Sakai, K., Kitaguchi, K., Hikosaka, O. Chunking during visuomotor sequence learning // *Experimental Brain Research*, 2003, vol. 152, pp. 229-242.
42. Salthouse, T.A. Perceptual, cognitive, and motoric aspects of transcription typing // *Psychological Bulletin*, 1986, vol. 99, pp. 303-319.
43. Sidaway, B., Yook, D. Distributed control in rapid sequential aiming responses // *Journal of Motor Behavior*, 1999, vol. 31(4), pp. 367-380.
44. Sternberg, S., Monsell, S., Knoll, R.L., Wright, C.E. The latency and duration of rapid movement sequences; Comparisons of speech and typewriting / In G. Stelmach (Ed.), *Information processing in motor control and learning* (pp. 117-152). New York: Academic Press, 1978.
45. Sternberg, S., Wright, C.E., Knoll, R.L., Monsell, S. Motor programs in rapid speech: Additional evidence / In R.A Cole (Ed.), *The Perception and Production of Fluent Speech* (pp. 507-534). Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1980.
46. Sun R. Introduction to sequence learning // *Sequence Learning – Paradigms, Applications and Algorithms*, Springer-Verlag LNAI, 2000, vol. 1828, pp. 1–10.
47. Verwey, W.B. Buffer loading and chunking in sequential key pressing // *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 1996, vol. 22, pp. 544-562.
48. Verwey, W.B. Processing modes and parallel processors in producing familiar keying sequences // *Psychological Research*, 2003, vol. 67, pp. 106-122.
49. Willingham, D.B. Implicit motor sequence learning is not purely perceptual // *Memory and Cognition*, 1999, vol. 27(3), pp. 561–572.
50. Wing, A. The long and short of timing in response sequences / In G. Stelmach and J. Requin (Eds.), *Tutorials in motor behavior*. New York: North-Holland, 1980.

Поступила в редакцию: 16.01.2014 г.

Сведения об авторах

А.И. Назаров – кандидат психологических наук, профессор кафедры психологии Международного университета природы, общества и человека «Дубна».

E-mail: koval39@inbox.ru

А.В. Набатов – студент 2 курса магистратуры кафедры психологии Международного университета природы, общества и человека «Дубна»