

УДК 612.821.1

ВЫПОЛНЕНИЕ СЕРИИ ДВИЖЕНИЙ, ЗАДАВАЕМОЙ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬЮ СЕНСОРНЫХ СИГНАЛОВ.
ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ РАЗЛИЧИЯ В ХАРАКТЕРЕ НАЧАЛЬНОЙ
СТАДИИ СЕРИЙНОГО НАУЧЕНИЯ.

© 2009 г. А.В. Курганский, П.П. Григал

Институт возрастной физиологии РАО, Москва

e-mail: akurg@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.12.2008 г.

Принята в печать 09.02.2009 г.

Исследовали индивидуальные особенности начальной стадии серийного научения в задаче на воспроизведение серий движений, задаваемых последовательностью зрительных стимулов. В эксперименте приняли участие 20 взрослых испытуемых, которые помимо задачи на воспроизведение последовательности выполняли задачу на простую зрительно-моторную реакцию, задачу на реакцию выбора и задачу на серийную реакцию выбора. Установлено, что индивидуальная зависимость латентного времени выполнения последовательности от порядкового номера пробы — кривая научения — имеет характерную особенность: сокращение латентного времени, если оно наблюдалось, происходило либо быстро в течение первых 10 проб до стационарного уровня (быстрая фаза), либо медленно и приблизительно линейно убывало на протяжении всего блока 60 проб (медленная фаза). Разнообразие индивидуальных кривых научения исчерпывалось четырьмя формами: плоской зависимостью, кривой с быстрой фазой, кривой с медленной фазой и кривой, где за быстрой фазой следовала медленная. В соответствии с типом кривой научения все испытуемые были разделены на четыре группы. Был проведен анализ корреляционной структуры временных параметров (латентного времени и длительностей интервалов между движениями) в пределах каждой группы и соотнесение этих параметров со временем простой зрительно-моторной реакции, временем реакции выбора и степенью научения в задаче на серийное время реакции. Этот анализ выявил значимые различия между группами испытуемых, что указывает на стоящие за таким разделением на четыре группы существенные функциональные различия. Предполагается, что индивидуальные различия на начальном этапе серийного научения определяются главным образом функциональной и структурной сложностью внутренней репрезентации последовательности, а также теми процессами рабочей памяти, которые обеспечивают идентификацию задающей последовательности зрительных стимулов и осуществляют преобразование абстрактной репрезентации в последовательность моторных команд.

Ключевые слова: индивидуальные различия, серийное научение, стадии научения, абстрактная внутренняя репрезентация, рабочая память.

Producing a Sequence of Movements in Response to a Sequence of Visual Stimuli. Inter-Individual Differences in Early Phase of Sequence Learning

A.V. Kurgansky, P.P. Grigal

Institute of Developmental Physiology, Russian Academy of Education,
Moscow

e-mail: akurg@yandex.ru

In this work, we studied the inter-individual variants in the early stage of serial learning in the sequence reproduction task where subjects were asked to produce a sequence of movements whose serial order was given by the sequence of visual stimuli. A total of 20 adults participated in the experiment where, besides the sequence reproduction task, each subject also performed the simple visuo-motor reaction time task, the choice reaction time task and the serial reaction time task. It was found that individual latency vs. trial number plots (learning curves) were characterized by one distinctive feature: the latency reduction, if any, took a form of either an abrupt decline down to a stationary level (fast phase) or a gradual approximately linear leveling off over entire block of trials (slow phase). The diversity of the individual learning curves were limited to the following four types: a flat curve, a curve with the fast phase only, a curve with slow phase only, and a curve that combined both phases with the leading fast phase followed by slow phase. All the subjects were subdivided into four groups according to the subject's type of learning curve. We analyzed the correlation pattern among temporal indices (latencies and inter-response-intervals) and compared those indices against simple visuo-motor reaction time, choice reaction time and the amount of learning in the serial reaction time task. The significant between-group differences found in this analysis suggest that there are some essential functional differences related to the group break up. It was suggested that inter-individual variants in the character of the early stage of sequence learning are determined mainly by the functional and structural complexity of the internal representation of sequence and by the way the working memory operates in order to recognize the driving sequence of visual stimuli and to translate the internal representation of a sequence into motor commands

Key words: inter-individual differences, sequence learning, stages of learning, abstract representation, working memory.

Серийное научение (serial learning или sequence learning)

представляет собой один из наиболее фундаментальных аспектов процесса двигательного научения [4, 17]. Внешне процесс серийного научения выражается в изменении характеристик последовательности движений, таких как частота ошибок, общая скорость выполнения движения и чувствительности к присутствию конкурентной задачи. В процессе серийного научения происходят и существенные изменения внутренней репрезентации движения [7, 8, 14], в частности переход от абстрактной эффекторо-неспецифической формы к эффекторо-специфической [3, 11]. Результатом научения является формирование устойчивого навыка (автоматизма), причем для достижения стадии автоматизма обычно требуется длительный период научения, который может продолжаться от нескольких дней до многих лет в зависимости от сложности задачи [8, 15]. Выполнение движения на стадии автоматизма протекает без участия произвольного внимания и не опирается на функцию рабочей памяти [5, 17]. Напротив, начальная стадия серийного научения требует высокого уровня произвольного внимания, часто характеризуется поэлементным выполнением элементов серии и может опираться на осознаваемые когнитивные стратегии, такие как проговаривание или внутренняя визуализация, требующие перекодирования информации [1, 5, 21].

Хотя общие закономерности процесса серийного научения исследуются уже более полутора веков [18], вопрос о его индивидуальных вариантах до сих пор не являлся предметом систематического экспериментального изучения. Накопленные к настоящему времени обширные поведенческие данные о функциональной и мозговой организации процесса научения относятся к группам испытуемых [10, 12, 13, 17], а сведения об индивидуальных ее особенностях косвенно содержатся в мерах разброса групповых средних или же ограничиваются отдельными наблюдениями и анализом клинических случаев. Между тем вопрос об индивидуальных особенностях серийного научения имеет и

теоретическое и практическое значение: с теоретической точки зрения изучение индивидуальных вариантов хода серийного научения позволяет лучше понять природу усредненных по группе данных [9], а с практической точки зрения такое изучение необходимо для обоснованного выбора индивидуализированных методик обучения и реабилитации.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию характера индивидуальных вариантов начального этапа серийного научения в задаче на воспроизведение последовательности. В этой задаче испытуемого просили максимально быстро выполнять последовательность простых движений в ответ на предъявление последовательности зрительных стимулов, задающих порядок требуемых движений по известным испытуемому правилам соответствия между зрительным стимулом и движением. Процесс научения исследовался на протяжении блока из 60 проб и характеризовался в этой работе исключительно с позиций хронометрии: анализировались зависимости латентного времени выполнения последовательности и длительности интервалов между смежными движениями в зависимости от номера пробы. Подчеркнем, что в этом исследовании мы предположили, что процесс серийного научения в пределах одной непрерывной сессии продолжительностью несколько минут не приводит к образованию эффекторо-специфической внутренней репрезентации [12, 14], и, следовательно, можно ожидать, что внутренняя репрезентация последовательности будет носить абстрактный характер.

Наряду с задачей на воспроизведение последовательности испытуемые выполняли также три дополнительные задачи: задачу на простую зрительно-моторную реакцию, задачу на реакцию выбора, задачу на серийное время реакции (серийную реакцию выбора). Ниже мы будем использовать принятые в международной литературе обозначения для задачи на простую зрительно-моторную реакцию (sRT), задачи на реакцию выбора (cRT), задачи на серийное время реакции (SRT), а для задачи на воспроизведение последовательности — обозначение "SQR" (сокращение

от "sequence reproduction"). Мы исходили из того, что эти четыре задачи образуют ряд с усложняющейся функциональной организацией, в котором задача sRT является простейшей. Задача cRT дополнительно включает принятие решения [20], задача SRT помимо этого требует участия рабочей памяти [17] и, наконец, задача SQR включает в себя функциональные компоненты всех предыдущих, но является более сложной, поскольку предполагает не только удержание последовательности стимулов в памяти и ее опознание (эксплицитное или имплицитное) как в задаче SRT, но и выполнение серии движений, что в свою очередь требует более сложного процесса подготовки (motor preparation), чем в случае одиночного двигательного ответа [17].

Таким образом, идея настоящего исследования заключалась в том, чтобы в задаче SQR сопоставить индивидуальные кривые научения с усредненными по группе кривыми научения, а также оценить функциональную организацию, анализируя соотношение между временной структурой серий движений в задаче SQR и временными параметрами трех предположительно более простых по своей функциональной структуре задач (sRT, cRT и SRT).

МЕТОДИКА

Испытуемые. В эксперименте приняли участие 20 взрослых (19-47 лет) испытуемых, с нормальным или скорректированным к нормальному зрением и с явным предпочтением правой руки.

Задачи. Испытуемым предлагалось решать четыре задачи:

1) задачу на простую зрительно-моторную реакцию (sRT), 2) задачу на реакцию выбора из трех альтернатив (cRT), 3) модифицированную задачу на серийное время реакции (SRT); 4) задачу на воспроизведение последовательности движений (SQR), задаваемой последовательностью зрительных стимулов.

В задаче sRT испытуемые должны были как можно быстрее

реагировать на появление зрительного стимула (небольшого квадрата, расположенного в центре экрана), нажимая указательным пальцем на кнопку ответа. Каждый испытуемый выполнил блок из 60 проб. На рис. 1, *a* показана временная диаграмма пробы, и в подписи к нему даны пояснения.

В задаче cRT испытуемые выполняли блок из 60 проб, в которых требовалось нажать одну из трех кнопок ответа указательным (*i*), средним (*m*) или безымянным (*r*) пальцем правой руки в ответ на появление зрительного стимула соответственно в левой, средней или правой рамке. Временная диаграмма пробы показана на рис. 1, *б*.

Задача SRT во всем идентична задаче cRT (рис. 1, *б*), за исключением того, что последовательность стимулов периодически повторялась, о чем испытуемому не сообщалось. В этой задаче использовалась последовательность *m-i-r-m*, которая на протяжении 60 проб была повторена 15 раз.

В задаче SQR испытуемым предлагалось как можно быстрее, но не допуская ошибок, воспроизводить последовательности движений, заданные последовательностью стимулов. Правило соответствия движений пространственному положению стимула было в точности такое же, как и в задачах cRT и SRT (рис. 1, *б*). Временная диаграмма пробы и пояснения к ней представлены на рис. 1, *в*. Испытуемые выполняли блок из 60 проб, в каждой из которых с равной вероятностью могла быть предъявлена одна из двух последовательностей: *i-r-i-m* или *i-r-m-m*. При этом испытуемые до начала выполнения проб не знали, какие именно последовательности (и сколько разных) им предстоит выполнять.

Экспериментальная установка. Эксперимент проводился с помощью компьютерной программы, обеспечивающей предъявление зрительных стимулов в соответствии с заданным временным расписанием, а также позволяющей измерять время действительного предъявления зрительных стимулов и время замыкания кнопок ответа с миллисекундной точностью.

Зрительная стимуляция. Зрительные стимулы предъявлялись на LCD-мониторе (частота кадровой развертки 60 Гц) в положительном контрасте (белые на черном фоне). Для фиксации взора в задаче sRT использовалась расположенная в центре экрана белая квадратная рамка со стороной, приблизительно равной 1 см (рис 1, *а*); в остальных задачах этой цели служила средняя в ряду из трех рамок (рис.1, *б*). Стимулом служил сплошной белый квадрат, совпадавший по размеру с рамкой и заменявший ее на время экспозиции. В задачах sRT, cRT и SRT время экспозиции стимула составляло 200 мс, а в задаче SQR — 100 мс.

Типичное расстояние от глаз до экрана монитора могло меняться от испытуемого к испытуемому в пределах 50-70 см, что соответствовало угловым размерам наиболее протяженного объекта (трех рамок, расположенных в ряд) 2-4 угл. град.

Экспериментальная процедура. Задачи выполнялись в фиксированной последовательности: sRT, cRT, SRT и SQR в течение одной сессии эксперимента. Перед выполнением очередной задачи испытуемые получали устную инструкцию, сопровождаемую показом характера стимуляции. Перед задачей SQR дополнительно проводили короткую (7-10 проб) тренировочную сессию, в которой использовалась последовательность, отличная от тестовых. Непосредственно перед выполнением каждой задачи испытуемым напоминали о необходимости принять удобную позу, фиксировать взор на центре экрана (на одной рамке в задаче sRT или на центральной рамке в остальных задачах) и давать двигательные ответы максимально быстро, избегая ошибок и не исправляя их, если они уже допущены.

В процессе выполнения задач испытуемый сидел за столом в комфортной позе, положив предплечья на поверхность стола и расположив подушечки трех пальцев (*i*, *m*, *r*) непосредственно над кнопками ответа. Ни в одной из задач испытуемые не получали текущей обратной связи относительно правильности двигательного ответа и времени реакции.

Анализ данных. Для каждого испытуемого во всех четырех задачах (sRT, cRT, SRT и SQR) вычислялось латентное время движения (время реакции), а в задаче SQR, кроме того, определяли интервалы между смежными движениями. В задаче SQR анализировались временные параметры (латентное время и длительности интервалов) только для правильно воспроизведенных последовательностей.

Статистический анализ данных проводили с использованием линейного регрессионного анализа, дисперсионного анализа как одной (ANOVA), так и многих (MANOVA) переменных и корреляционного анализа. Для сравнения двух выборок использовали также t-тест Стьюдента.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В этом разделе сначала будут приведены результаты анализа данных (латентного времени и длительности интервала) по всем испытуемым, а затем будут обсуждаться результаты анализа индивидуальных данных. При этом мы будем придерживаться следующих обозначений: буквой T — латентное время (время реакции), буквой I — длительность интервала между смежными движениями при воспроизведении последовательности. Для того чтобы подчеркнуть тот факт, что величина (T или I) зависит от порядкового номера пробы n , мы будем использовать обозначение (n) . Нижний индекс при букве T используется для указания, о латентном времени в какой задаче идет речь, а верхний индекс — для указания того, идет ли речь о величине в начале (b) или же в конце (e) выполнения блока проб. Например, T_{SRT}^b означает величину времени реакции выбора в самом начале выполнения задачи на серийную реакцию выбора (SRT). Наконец, символ Δ будет использоваться для обозначения разности двух величин.

Анализ данных для всей группы испытуемых

Среднее время реакции в задаче на простую зрительно-моторную

реакцию (T_{SRT}) составило 250 ± 18 мс, в задаче на реакцию выбора (T_{cRT}) — 376 ± 54 мс, а среднее сокращение времени реакции ΔT_{SRT} в задаче SRT оказалось равным 32 ± 47 мс. В целом по всей группе испытуемых сокращение латентного времени оказалось высокозначимым как в задаче SRT ($T_{SRT}^b = 376$ мс, $T_{SRT}^e = 344$ мс; $t(19) = 3.0697$, $p = 0.0063$), так и в задаче SQR ($T_{SQR}^b = 723$ мс, $T_{SQR}^e = 521$ мс; $t(19) = 5.215$, $p < 0.0001$).

В процессе воспроизведения последовательностей в задаче SQR испытуемые практически не совершали ошибок. Так, доля последовательностей с лишним (5-м) ответом составила 1.5%, а доля последовательностей правильной длины (4 ответа), в которых был нарушен порядок движений, составила 2.51%. По ходу выполнения проб в задаче SQR в целом по всей группе испытуемых наблюдалась тенденция к уменьшению частоты ошибок обоих типов. Однако общее число ошибок оказалось слишком малым для корректной оценки статистической значимости этой тенденции.

Усредненная по всем испытуемым и последовательностям зависимость латентного времени от номера пробы $T_{SQR}^{\bar{n}}$ (рис. 2, а) характеризуется наличием двух последовательных фаз: быстрой и медленной. В быстрой фазе (приблизительно первые 10 проб) T_{SQR} сокращается более чем на 100 мс; медленная фаза длится на протяжении остальных 50 проб и характеризуется линейным убыванием латентного времени еще приблизительно на 50 мс.

Сравнение усредненных по группе кривых $T_{SQR}^{\bar{n}}$ отдельно для двух последовательностей показало, что латентное время последовательности *i-r-i-m* превышает латентное время *i-r-m-m* на протяжении всего блока из 60 проб (данные не представлены).

Зависимость разности латентных времен $\Delta T_{SQR}^{\bar{n}}$ для последовательностей *i-r-i-m* и *i-r-m-m* (рис. 2, б) в первом приближении аппроксимируется прямой, наклон которой, как показывает линейный

регрессионный анализ, статистически незначим ($p > 0.2$). Поскольку зависимость ΔT_{SQR} оказалась параллельной горизонтальной оси, разность латентных времен для двух последовательностей можно охарактеризовать ее средним значением, которое оказалось равным 101 мс. Это различие длительности латентного периода для последовательностей $i-r-i-m$ и $i-r-m-m$ высоко значимо (t-тест для связанных выборок; $t(19) = 7.8$; $p < 10^{-5}$).

Характер зависимости усредненных по всем испытуемым интервалов от номера пробы отличается от динамики латентного времени. Сокращение средней длительности интервалов I заметно только на протяжении первых 10 проб (рис. 2, в) и примерно соответствует длительности быстрой фазы научения в динамике латентного времени (рис. 2, а). Хотя в конце выполнения задачи ($n > 30$) заметна некоторая тенденция к возрастанию длительности интервала (рис. 2, в), линейный регрессионный анализ показал, что ни один из 6 интервалов ($i-r$, $r-i$, и $i-m$ для последовательности $i-r-i-m$; $i-r$, $r-m$, $m-m$ для последовательности $i-r-m-m$) не зависит от номера пробы в диапазоне от 11-й до 60-й пробы (все вероятности больше 0.21). Поэтому ниже мы анализировали интервалы, усредненные по 50 пробам этого стационарного диапазона. Многомерный дисперсионный анализ (MANOVA) длительности интервала I в зависимости от вида последовательности ($i-r-i-m$, $i-r-m-m$) и его положения (1-й, 2-й или 3-й) в последовательности показал значимое влияние фактора положения интервала ($F(2,17) = 16.284$; $p < 10^{-4}$), при этом ни влияние вида последовательности, ни взаимодействие факторов не достигало уровня значимости ($p = 0.131$ и $p = 0.372$ соответственно). Парные *post hoc* сравнения длительностей интервалов показали, что влияние фактора "положение интервала" объясняется в среднем большей длительностью второго интервала в обеих последовательностях (рис. 2, з).

Линейный корреляционный анализ переменных T_{SRT} , T_{CRT} , ΔT_{SRT} , T_{SQR}^b , T_{SQR}^e и I_{SQR} показал, что для всей выборки испытуемых

значимые корреляции наблюдаются между T_{sRT} и T_{sQR}^b ($r = 0.65$; $p = 0.0017$), между T_{cRT} и I_{sQR} ($r = 0.52$; $p = 0.018$); кроме того, средняя длительность интервала I_{sQR} значимо коррелирует с T_{sQR}^b ($r = 0.47$; $p = 0.038$) и с T_{sQR}^e ($r = 0.6$; $p = 0.0051$). Таким образом, в ряду четырех задач статистически значимым предикторами в отношении задачи SQR оказались: для латентного времени в начале выполнения задачи — время простой зрительно-моторной реакции T_{sRT} , а для длительности интервала — время реакции выбора T_{cRT} .

Анализ индивидуальных данных

В индивидуальных зависимостях $T_{sQR} \overline{n}$, как и в усредненной по группе кривой $T_{sQR} \overline{n}$, присутствуют фазы быстрого (7-20 первых проб) и медленного (линейное убывание на протяжении всего или почти всего блока проб) научения, которые можно приблизительно аппроксимировать сегментами прямой линии. В зависимости от присутствия (отсутствия) быстрой и медленной фаз научения в индивидуальных кривых $T_{sQR} \overline{n}$ все испытуемые были разделены на четыре группы: группу Г1, у которой научение вообще отсутствует (6 испытуемых); группу Г2, демонстрирующую только быструю фазу (7 испытуемых); группу Г3, для которой характерна только медленная фаза (5 испытуемых); наконец, 2 испытуемых составили группу Г4, показав и быструю и медленную фазы научения одновременно. Для разделения на группы мы использовали линейный регрессионный анализ, который позволил оценить статистическую значимость наклона участков кривой $T_{sQR} \overline{n}$, и статистическая значимость наклона соответствующего участка зависимости $T_{sQR} \overline{n}$ была использована в качестве критерия присутствия (или отсутствия) быстрой и медленной фаз. Характерные индивидуальные кривые научения вместе с линиями регрессии показаны на рис. 3, а.

Дальнейший статистический анализ был направлен на выявление различий в параметрах $T_{sRT}, T_{cRT}, \Delta T_{sRT}, T_{sQR}^b, T_{sQR}^e, I_{sQR}$ и ΔT_{sQR} , связанных с

принадлежностью испытуемых к той или иной группе, и на оценку специфических для разных групп паттернов линейных корреляций между этими параметрами.

Однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) времени реакции в задачах sRT, cRT, а также величины научения ΔT_{sRT} в задаче на серийную реакцию выбора показал значимое влияние фактора принадлежности к группе на величину T_{sRT} ($F(3,16) = 3.42; p = 0.0428$). Влияние фактора "группа" на остальные две величины оказалось не значимым ($p > 0.4$).

Однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) латентного времени T_{sQR}^b , где фактором служила принадлежность к одной из четырех групп Г1, Г2, Г3 и Г4 (фактор "группа"), выявил значимое влияние фактора "группа" ($F(3,16) = 5.06; p = 0.0118$), причем последующие попарные сравнения показали, что этот эффект возникает благодаря систематически меньшему латентному времени T_{sQR}^b в группе Г1 (554 мс) по сравнению с остальными группами (777, 820 и 800 мс соответственно для Г2, Г3 и Г4), которые в этом отношении не отличались друг от друга ($p = 0.85$).

При этом, аналогичный анализ T_{sQR}^e не показал значимых различий между группами ($p = 0.65$). В частности, сравнение латентного времени в группе Г1 с латентным временем на плоской ($n > 10$) части кривой $T_{sQR}^{\bar{n}}$ в группе Г2 не выявило значимых различий (тест Стьюдента для независимых выборок: $p > 0.37$). Однофакторный дисперсионный анализ влияния фактора "группа" (Г1, Г2, Г3 и Г4) на усредненную по пробам величину $\Delta T_{sQR}^{\bar{n}}$ не выявил значимого влияния фактора "группа" на эту величину ($p = 0.3754$). Таким образом, можно считать, что различие в латентном времени между последовательностями *i-r-i-m* и *i-r-m-m* не зависит от типа кривой научения $T_{sQR}^{\bar{n}}$. Наконец, многомерный дисперсионный анализ (MANOVA) интервалов между смежными движениями на стационарном участке (с 11-й по 60-ю пробу), в котором

факторами служили "последовательность" ($i-r-i-m$, $i-r-m-m$), "положение интервала" (1,2,3) и "группа" (Г1, Г2, Г3 и Г4), показал, что, как и в случае анализа всей выборки испытуемых, единственным значимым эффектом является влияние положения интервала ($F(2,14) = 10.366$; $p = 0.002$); влияние всех остальных факторов и их взаимодействия не достигали уровня значимости (все вероятности больше 0.26). Результат этого анализа позволяет рассматривать профиль длительностей интервалов без учета подразделения испытуемых на группы – иными словами, как общий для всех испытуемых.

Анализ индивидуальных профилей длительностей интервалов (два профиля для $i-r-i-m$ и $i-r-m-m$ для каждого испытуемого) показывает, что в большинстве индивидуальных случаев (26 из 40) второй интервал действительно является самым продолжительным (данные не приводятся). Однако отклонение от доминирующего "треугольного профиля" нельзя приписать исключительно флуктуациям, как показывают два примера различных устойчивых индивидуальных профилей интервалов в $i-r-m-m$, не соответствующих усредненному (рис. 3, б и в): видно, что у испытуемого И4 (группа Г2) на протяжении всех 60 проб самым коротким интервалом был интервал $m-m$ (рис. 3, б), а у испытуемого И10 (Г4) — интервал $i-r$ (рис. 3, в).

Корреляционный анализ переменных

$T_{sRT}, T_{cRT}, \Delta T_{sRT}, T_{sQR}^b, T_{sQR}^e, I_{sQR}$ и ΔT_{sQR} , выполненный отдельно для каждой из групп Г1, Г2 и Г3 (группа Г4 была исключена из анализа, поскольку в ней всего 2 испытуемых), показал, что группы различны в отношении корреляционной картины. В группе Г1 оказались значимыми корреляция между T_{sRT} и I_{sQR} ($r = 0.85$; $p = 0.031$), а также корреляция средней длительность интервала I_{sQR} с длительностью латентного T_{sQR}^b ($r = 0.897$; $p = 0.0154$). В группе Г2 обнаружена единственная значимая корреляция между ΔT_{sRT} и I_{sQR} ($r = 0.91$; $p = 0.0046$). Наконец, в группе Г3 также обнаружена значимая корреляция между T_{sRT} и ΔT_{sRT} ($r = 0.9239$; $p =$

0.0249), а также тенденции к корреляции между T_{SQR}^b и T_{SQR}^e ($r = 0.8712$; $p = 0.0544$), а также между T_{sRT} и T_{SQR}^b ($r = 0.8473$; $p = 0.07$).

Следует отметить, что наблюдаемой в целом по группе значимой корреляции между T_{sRT} и T_{SQR}^b , равной 0.65, соответствуют относительно высокие, хотя и незначимые корреляции в группах Г1 ($r = 0.594$) и Г3 ($r = 0.847$), но при этом в группе Г2 такая корреляция полностью отсутствует ($r = 0.085$). Корреляционный анализ, выполненный для всей группы испытуемых, игнорирует различие в средних значениях коррелируемых величин в подгруппах, и поэтому в таком случае корреляции могут возникать как за счет внутригрупповых корреляций, так и за счет корреляции групповых средних. Для того чтобы исключить вторую причину, в каждой группе Г1-Г4 из каждого параметра было вычтено его среднее по этой группе значение, после чего эти "центрированные" данные были объединены в единую выборку параметров и вновь проведен корреляционный анализ. Этот анализ показал, что мало изменились и по-прежнему остались значимыми корреляции между I_{SQR} и T_{cRT} , а также между I_{SQR} , с одной стороны, и T_{SQR}^b и T_{SQR}^e – с другой. Однако корреляция между T_{sRT} и T_{SQR}^b уменьшилась от 0.65 до 0.4 и оказалась незначимой, оставаясь на уровне тенденции ($p = 0.08$). Этот последний результат показывает, что исходная статистическая связь между T_{sRT} и T_{SQR}^b в значительной степени была вызвана ковариацией групповых средних, т.е. возникала за счет того, что в группе Г1 наблюдаются не только наименьшие значения T_{SQR}^b , но и самые низкие значения времени простой зрительно-моторной реакции T_{sRT} . В ходе анализа "центрированных" по каждой подгруппе данных были выявлены также две новые значимые корреляции: между T_{sRT} и T_{SQR}^e ($r = 0.4782$; $p = 0.033$) и между T_{SQR}^b и T_{SQR}^e ($r = 0.666$; $p = 0.0013$).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наличие по крайней мере четырех различных типов индивидуальных зависимостей латентного времени в задаче SQR свидетельствует о том, что усредненная по всем испытуемым зависимость $T_{SQR} \approx n$ характеризует не столько общий для всех испытуемых процесс научения, сколько представленность разных типов кривых научения в популяции. Здесь, однако, возникает вопрос: насколько обосновано предпринятое нами разделение испытуемых на четыре группы и не отражает ли такое разделение просто произвольное отнесение испытуемых к разным группам в зависимости от количественной выраженности скорости научения?

Присутствие в индивидуальных кривых фаз быстрого и медленного научения во всех возможных сочетаниях позволяет высказать гипотезу о независимости лежащих в их основе механизмов. Наполнение четырех групп испытуемых находится в хорошем согласии с этой гипотезой. Действительно, если предположить, что вероятность наличия быстрой фазы (из 20 испытуемых она присутствует у 7 в группе Г2 и у 2 в группе Г4) в популяции составляет $p_f = 9/20$, а вероятность наличия медленной фазы (присутствует у 5 испытуемых в Г3 и у 2 в Г4) составляет $p_s = 7/20$ и что эти события независимы, тогда вероятность отсутствия этих фаз будет $(1 - p_f)(1 - p_s) \approx 0.3575$, а вероятность их совместного присутствия — $p_f p_s = 0.1575$. В соответствии с этими вероятностями для группы из 20 человек ожидаемые средние величины 7.15 для случая отсутствия фаз и 3.15 для случая одновременного присутствия двух фаз близки к наблюдаемым наполнениям групп Г1 (6 испытуемых) и Г4 (2 испытуемых).

Еще одним свидетельством в пользу того, что разделение на группы отражает реальные различия между механизмами научения, являются различия между тремя группами (Г1-Г3) в структуре корреляционных связей временных параметров как в задаче SQR, так и в

особенности связей параметров задачи SQR с параметрами задач sRT, cRT и SRT. Как мы видели, для группы Г1 оказалась характерна сильная корреляционная связь между T_{sRT} и I_{SQR} . В группе Г2 длительность интервала I_{SQR} коррелировала с ΔT_{sRT} . Наконец, в группе Г3 также обнаружена значимая корреляция между T_{sRT} и ΔT_{sRT} . Учитывая малое наполнение групп, эти данные нельзя считать вполне убедительными. Более надежным, по крайней мере в отношении различий между Г1 и остальными группами, является значимо меньшее латентное время T_{SQR}^b и время простой зрительно-моторной реакции T_{sRT} у испытуемых группы Г1 по сравнению с испытуемыми остальных групп.

Испытуемые были разделены на группы на основании характера зависимости латентного времени от номера пробы. Как мы видели, группы различаются также величиной латентного времени в первых пробах, но это различие практически исчезает к концу блока проб. Таким образом, разделение на группы отражает вариативность именно начальной стадии научения: эта вариативность выражается в величине начального латентного времени и в форме кривой научения, которая определяет также продолжительность начальной стадии научения.

Какого рода особенности функциональной организации процесса научения могут определять характер наблюдаемых кривых научения? Хотя без проведения дополнительных экспериментов на этот вопрос трудно ответить с определенностью, все же можно высказать некоторые соображения. Так, очевидно, что в самом начале выполнения задачи SQR (в нескольких первых пробах), когда испытуемым еще ничего не известно о структуре последовательностей, единственный возможный способ воспроизвести последовательность – это сформировать внутреннюю репрезентацию последовательности непосредственно в процессе предъявления зрительных стимулов и сохранять ее в рабочей памяти до окончания выполнения последовательности движений. Не исключено, что на этом этапе мы имеем дело с множественными репрезентациями

последовательности: она может быть представлена как в виде последовательности стимулов, так и в виде последовательности эффекторов, причем в обоих случаях помимо кодирования пространственным положением и кинестетическим ощущением (в случае пальцев) возможно и речевое опосредование: например, "левый", "центральный", "правый" для стимулов и "указательный", "средний", "безымянный" для пальцев. Такая функциональная избыточность приводит к значительной нагрузке на рабочую память, что в свою очередь предполагает высокий уровень произвольного внимания. Так, в рамках модели А. Бэдли [2] в этом случае оказываются задействованными "фонологическая петля" и "зрительно-пространственный блокнот". Большая или меньшая функциональная сложность репрезентации последовательности может выражаться в большем или меньшем латентном времени выполнения движения (серии движений) за счет соответственно более поздней или более ранней выработки разрешающего движение сигнала ("go-signal"), который является неизменным атрибутом теоретических моделей формирования двигательного ответа в простой сенсомоторной реакции, в реакции выбора и в случае воспроизведения последовательности движений [6, 16, 20]. В этом отношении показательны различия между группой Г1, с одной стороны, и остальными тремя группами – с другой. Характерную для группы Г1 существенно меньшую по сравнению с другими группами величину латентного времени в самом начале выполнения задачи SQR и одновременно значимо меньшее время простой зрительно-моторной реакции можно отнести на счет более простой внутренней репрезентации последовательностей у испытуемых этой группы.

Сокращение латентного времени, наблюдаемое в задаче SQR по мере выполнения проб, может быть связано прежде всего с упрощением внутренней репрезентации последовательности: с избавлением от функциональной избыточности (дублирующих репрезентаций) и с

процессом оптимизации абстрактной (эффе́кторо-независимой) [11]. Процесс оптимизации связан с тем, что в ходе выполнения задачи SQR испытуемые обнаруживают, что последовательностей всего две, и обе последовательности начинаются с фрагмента $i-r$, за которым может следовать либо $i-m$, либо $m-m$. Открытие испытуемыми этих закономерностей может способствовать формированию в ЦНС эффективных внутренних репрезентаций последовательностей $i-r-i-m$ и $i-r-m-m$, построенных из фрагментов. Известно, что такая иерархическая структура внутренней репрезентации последовательности, в которой вся последовательность представлена в виде последовательности фрагментов (а каждый фрагмент в свою очередь представляет собой последовательность единичных движений) обычно сопровождается увеличением длительности интервала, разделяющего смежные фрагменты [10, 19]. Не исключено, что именно иерархической структурой репрезентации последовательностей, сформированной в первых пробах, объясняются общие для всех испытуемых и обеих последовательностей устойчивые соотношения. Одно из них состоит в тенденции к увеличению продолжительности второго интервала, отделяющего начальный фрагмент $i-r$ от последующего $i-m$ или $m-m$. С другой стороны, это систематически большее латентное время для последовательности $i-r-i-m$ по сравнению с последовательностью $i-r-m-m$. Его также можно связать с иерархической природой внутренней репрезентации последовательностей, предполагая, что процесс подготовки более простого фрагмента $m-m$ с повторным движением одного эффе́ктора требует меньше времени, чем процесс подготовки фрагмента $i-m$, кодирующего движения двух эффе́кторов.

Помимо формирования все более эффективной внутренней репрезентации последовательностей в наблюдаемое сокращение латентного времени может вносить вклад и механизм предсказания. Действительно, идентичность последовательности может быть установлена уже после предъявления третьего стимула (i для $i-r-i-m$; m для

i-r-m-m), что позволяет заранее начать подготовку (motor preparation) к выполнению серии движений, а фиксированные интервалы между стимулами (300 мс) дают возможность в точности предсказать момент предъявления последнего 4-го стимула, что позволяет раньше начать выполнение движений, не нарушая при этом инструкции, в соответствии с которой выполнение движений не должно начинаться раньше последнего 4-го стимула.

В отличие от зависимостей латентного времени от номера пробы в зависимостях интервалов от номера пробы доминирует общая для всех испытуемых тенденция к сокращению величины интервала на протяжении 5-10 проб, после чего до конца блока величины интервалов остаются более или менее постоянными. Отсутствие различий между группами в динамике интервалов при предполагаемых существенных различиях в характере и выраженной динамике внутренней репрезентации последовательности не удивительно, если исходить из того, что интервалы отражают структуру моторной программы, т. е. результат преобразования внутренней репрезентации последовательности из абстрактной в специфически моторную форму [17]. Возможно, заметное на протяжении первых нескольких проб сокращение интервалов связано с изменением характера такого преобразования, например, от "пошагового" по ходу выполнения последовательности движений к такому, при котором сначала вся последовательность транслируется в моторную форму и лишь затем выполняется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе мы обнаружили существенные индивидуальные различия в начальной фазе серийного научения, которые выражаются в вариативности величины латентного времени в начале выполнения задачи на воспроизведение последовательности, в характере

убывания латентного времени с номером пробы и, соответственно, в продолжительности такого убывания (приблизительно от 10 до 60 и более проб). Индивидуальные варианты зависимости латентного времени от номера пробы – кривой научения – в исследованной выборке испытуемых оказались таковы, что позволили разделить испытуемых на четыре группы в зависимости от присутствия или отсутствия быстрой и медленной фаз научения. Эти четыре группы испытуемых характеризуются четырьмя типами кривых научения: плоской, с быстрой фазой, с медленной фазой и с сочетанием быстрой и медленных фаз.

Выполненное исследование не позволяет ответить на вопрос, какие механизмы определяют различия между указанными четырьмя типами и исчерпывается ли все многообразие индивидуальных вариантов начального этапа научения этими четырьмя типами. Для этого необходимо было бы, как минимум, воспроизвести полученные в настоящем исследовании результаты на независимой группе испытуемых и выполнить ряд дополнительных исследований. Тем не менее значительное разнообразие в характере изменения латентного времени в ходе научения при сходной и слабо выраженной динамике временной структуры самого серийного движения (интервалов между движениями) указывает на то, что индивидуальные различия на начальном этапе серийного научения определяются главным образом не моторными процессами, а характером удерживаемой в рабочей памяти внутренней репрезентации последовательности (степенью ее "абстрактности" и структурной сложности) и теми процессами рабочей памяти, которые обеспечивают идентификацию задающей последовательности зрительных стимулов и осуществляют преобразование абстрактной репрезентации в последовательность моторных команд.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 07-04-00205-а)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бернштейн Н. А.* О построении движений. М.: Медгиз, 1947. 256 с.
2. *Baddeley A.*, Working memory: looking back and looking forward. *Nat. Rev. Neurosci.* 2003. 4:829-839.
3. *Bapi R.S., Miyapuram K.P., Graydon F.X., Doya K.* fMRI investigation of cortical and subcortical networks in the learning of abstract and effector-specific representations of motor sequences. *Neuroimage.* 2006. 32(2):714-727.
4. *Bapi R.S., Pammi V.S.C. Miyapuram K.P., Ahmed.* Investigation of sequence processing: A cognitive and computational neuroscience perspective. *Curr. Sci.* 2005. 89(10): 1690-1698.
5. *Beilock S.L., Carr T.H.* From novice to expert performance. *Memory, attention and the control of complex sensori-motor skills. Skill Acquisition in Sport.* V. 1. Pt. 4. Eds. A. Mark Williams, Nicola J. Hodges. Publisher: Routledge, UK. 2004: 309 - 327.
6. *Bullock D.* Adaptive neural models of queuing and timing in fluent action. *Trends Cog. Sci.* 2004. 8(9): 426-433.
7. *Doyon J., Benali H.* Reorganization and plasticity in the adult brain during learning of motor skills. *Curr. Opin. Neurobiol.* 2005. 15:161-167.
8. *Eversheim U., Bock O.* Evidence for processing stages in skill acquisition: A dual-task study. *Learn. Mem.* 2001. 8:183-189.
9. *Gobet F., Ritter F. E.* Individual data analysis and Unified Theories of Cognition: A methodological proposal. *Proceedings of the 3rd International Conference on Cognitive Modelling, Veenendaal, The Netherlands: Univ. Press.* 2000. 150-157.
10. *Grafton S.T., Hamilton A.F.* Evidence for a distributed hierarchy of action representation in the brain. *Hum. Mov. Sci.* 2007. 26(4):590-616.
11. *Grafton S.T., Hazeltine E., Ivry R.B.* Abstract and effector-specific

- representations of motor sequences identified with PET. *J. Neurosci.* 1998. 18(22):9420–9428.
12. *Karni A., Meyer G., Rey-Hipolito C., Jezzard P., Adams M., Turners R., Ungerleider L.G.* The acquisition of skilled motor performance: Fast and slow experience-driven changes in primary motor cortex. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 1998. 95:861–868.
 13. *Keele S.W., Ivry R., Mayr U. Hazeltine E., Heuer H.* The cognitive and neural architecture of sequence representation. *Psychol. Rev.* 2003. 110(2):316–339.
 14. *Korman M., Raz N., Flash T., Karni A.* Multiple shifts in the representation of a motor sequence during the acquisition of skilled performance. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2003. 100(21):12492–12497.
 15. *Moors A., De Houwer J.* Automaticity: A theoretical and conceptual analysis. *Psychol. Bull.* 2006. 132(2):297–326.
 16. *Mordkoff J.T., Yantis S.* An interactive race model of divided attention. *J. Exp. Psychol.: Hum. Percept. Perform.* 1991. 17(2):520-538.
 17. *Rhodes B.J., Bullock D., Verwey W.B., Averbeck B.B., Page M.P.A.* Learning and production of movement sequences: Behavioral, neurophysiological, and modeling perspectives. *Hum. Mov. Sci.* 2004. 23:699–746.
 18. *Rosenbaum D.A., Carlson R.A., Gilmore R.O.* Acquisition of intellectual and perceptual-motor skills. *Annu. Rev. Psychol.* 2001. 52:453–70.
 19. *Sakai K., Hikosaka O., Nakamura K.* Emergence of rhythm during motor learning. *Trends Cogn. Sci.* 2004. 8(12):547-553.
 20. *Smith P.L., Ratcliff R.* Psychology and neurobiology of simple decisions. *Trends Neurosci.* 2004. 27(3):161-167.
 21. *Willingham D.B.* A neuropsychological theory of motor skill learning. *Psychol. Rev.* 1998. 105(3): 558-584.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис.1. Временные диаграммы проб в задачах sRT (*a*), cRT и SRT (*б*) и в задаче SQR (*в*). В левой части рисунка показаны схематические изображения экрана монитора с представленными на нем изображениями, которые предъявляются испытуемому в случайно варьируемом временном интервале от начала пробы до начала предъявления стимула(ов). Этот интервал отмечен разрывом оси времени с многоточием; числа задают пределы его варьирования (в миллисекундах). Пунктирными стрелками показано, к какой (каким) задачам относится каждое такое схематическое изображение. Положение и продолжительность стимула (стимулов) на оси времени показана в виде черного прямоугольника, примыкающего к оси времени (число над ним или под ним соответствует времени экспозиции стимула), с началом которого ассоциирован "флажок" с условным изображением примера стимуляции. Толстые короткие стрелки с буквами *i*, *m* и *r*, обозначающие указательный (*i*), средний (*m*) и безымянный (*r*) пальцы правой руки, соответствуют моментам нажатия на кнопку (кнопки) ответа. Буквами *T* и *W* обозначены соответственно латентное время двигательной реакции и период ожидания ответа.

Рис.2. Усредненные по всей группе 20 испытуемых хронометрические данные для задачи SQR. *a* – зависимость латентного времени выполнения последовательности T_{SQR} от номера пробы *n*; *б* – зависимость разности латентного времени в последовательности *i-r-i-m* и в последовательности *i-r-m-m* ΔT_{SQR} от номера пробы *n*; *в* – зависимость усредненного (по 6 интервалам последовательностей *i-r-i-m* и *i-r-m-m*) интервала I_{SQR} от номера пробы *n*; *г* – усредненные по всем испытуемым длительности индивидуальных интервалов в последовательности *i-r-i-m* (темные столбики) и в последовательности *i-r-m-m* (заштрихованные столбики). Все величины даны в миллисекундах.

Рис.3. Индивидуальные хронометрические данные для задачи SQR. *a* – примеры индивидуальных зависимостей латентного времени выполнения последовательностей T_{SQR} от номера пробы n при наличии только быстрой фазы (вверху), при наличии только медленной фазы (в середине) и в случае плоской кривой научения (внизу). Пунктиром показаны линии регрессии, статистические значимости наклонов которых указаны над кривыми T_{SQR} . (б, в) — примеры зависимостей длительностей (в миллисекундах) интервалов $i-r$ (темные кружки), $r-m$ (серые квадраты) и $m-m$ (светлые треугольники) от номера пробы n в последовательности $i-r-m-m$; на врезках столбиками показаны средние по всем пробам длительности интервалов $i-r$, $r-m$ и $m-m$.

FIGURE CAPTIONS

Fig.1. The timing of events in trials of sRT (*a*), cRT, SRT (*б*) and SQR (*е*) tasks. The left-hand side of the figure shows the sketches of the computer screen with the stimuli shown to a subject during random time interval between the beginning of a trial and the beginning of the stimulus/stimuli presentation. This interval is marked with the ellipsis breaking the time axis; the variation limits (in milliseconds) are also shown for each interval. The dotted arrows show the sketch-to-task correspondence. The temporal positions and durations of stimuli are depicted with the short black bars that are aligned with the time axis; a number above/below each bar shows the corresponding stimulus exposure time. A small "flag" attached to the origin of each bar provides an example of stimulus/stimuli shown. The thick short arrows correspond to response times (keypress times). Responses given by the index, middle or the ring finger are abbreviated with *i*, *m* or *r*, respectively. Letters *T* and *W* stand for the latency and the response waiting period, respectively.

Fig.2. Chronometrical data averaged over the whole group of 20 subjects in SQR task. *a* – the latency for sequence reproduction T_{SQR} vs. successive trial number *n*; *б* – the difference in latencies ΔT_{SQR} between *i-r-i-m* and *i-r-m-m* sequences vs. successive trial number *n*; *е* – mean inter-response interval I_{SQR} (averaged across all 6 individual intervals of *i-r-i-m* and *i-r-m-m* sequences) vs. successive trial number *n*; *з* — individual interval mean durations (averaged across all subjects) in *i-r-m-m* sequence (dark bars) and *i-r-m-m* sequence (hatched bars). All the values are given in milliseconds.

Fig.3. Individual chronometrical data in SQR task. *a* — examples of the latency T_{SQR} vs. successive trial number *n* curves with the only fast learning phase present (top), the only slow learning phase present (middle), and with none of

them present, i.e. the flat curve (bottom). The best linear fits for the individual curves (and/or their segments) are shown in dotted lines with the statistical significance of their slope values printed above the $T_{SOR}^{[n]}$ curves. δ , ϵ – two individual examples of inter-response intervals (in milliseconds) vs. trial number n for $i-r$ (black circles), $r-m$ (gray squares) and $m-m$ (white triangles) intervals in the $i-r-m-m$ sequence; the bar graphs in the insets show (in corresponding ink) the mean over all trials duration of the above $i-r$, $r-m$ and $m-m$ intervals.

Proof

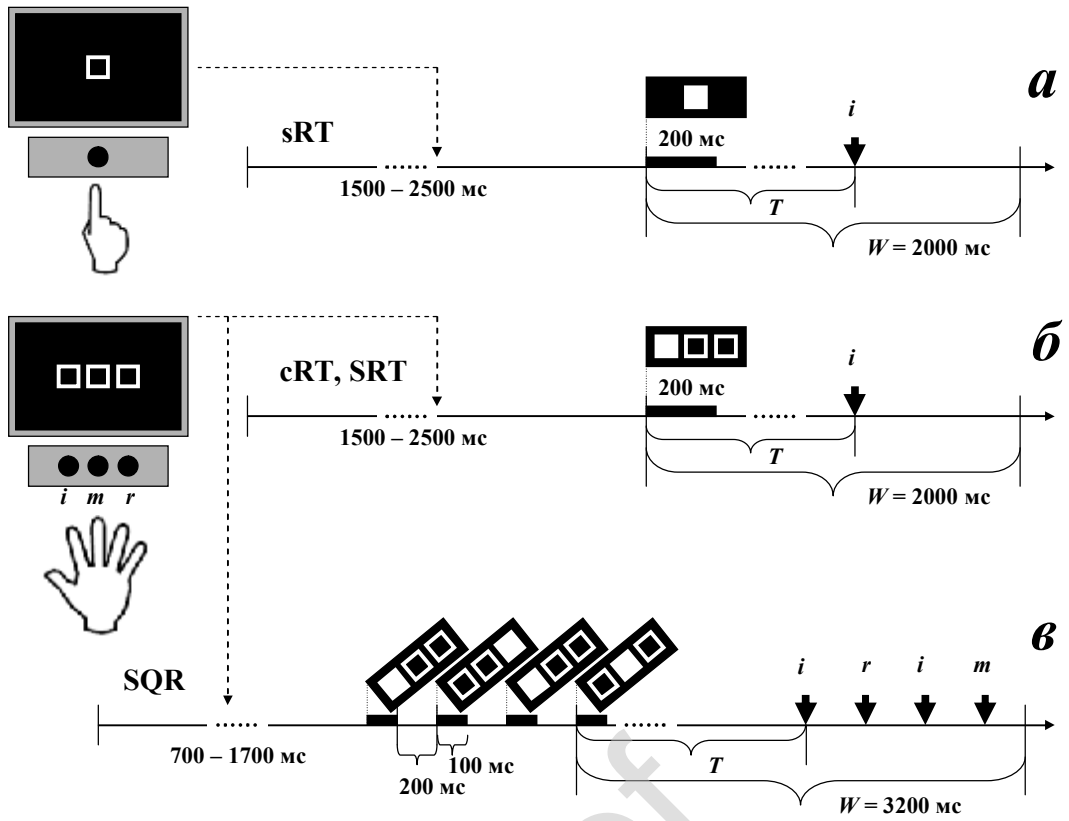


Рис.1.

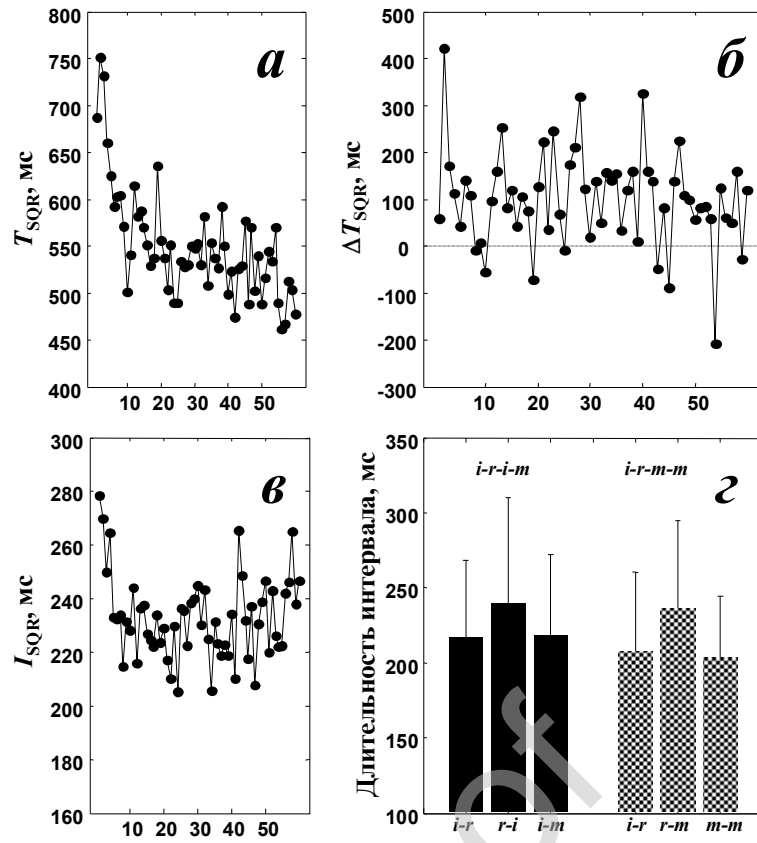


Рис.2.

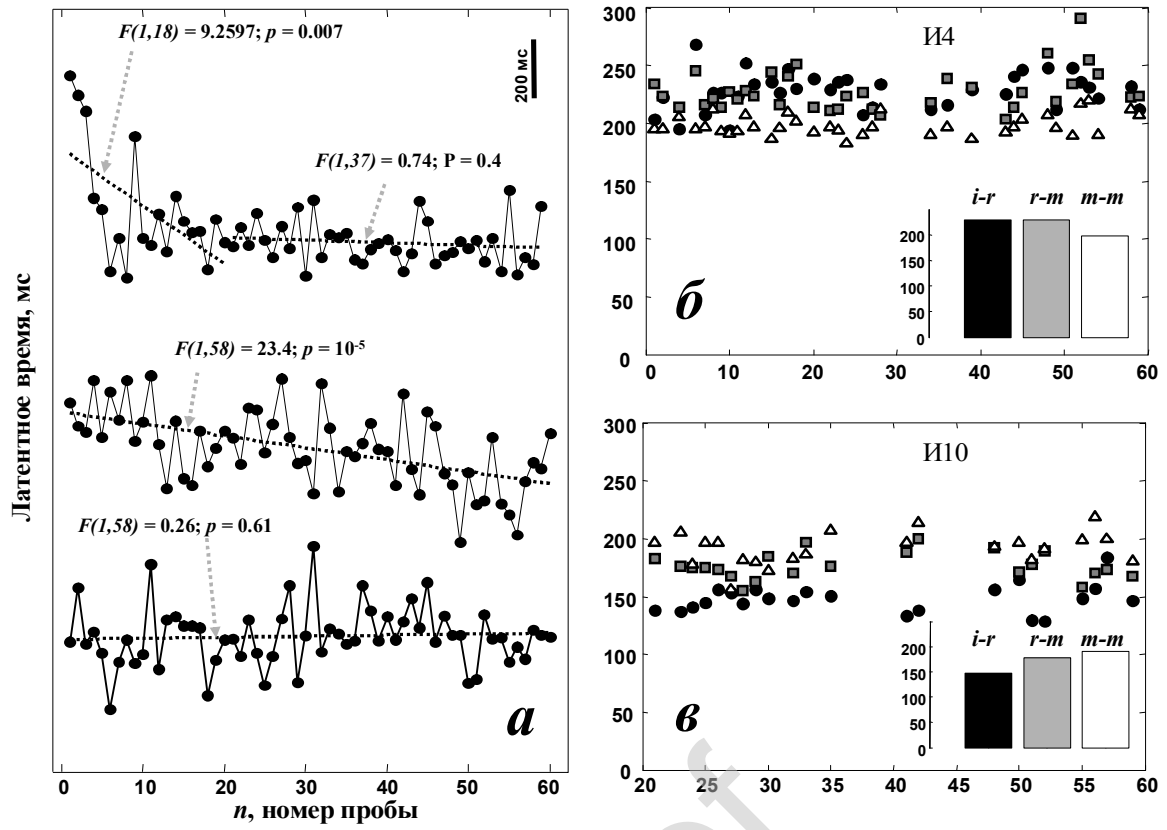


Рис.3.