

## АНАЛИЗ СЛЕДОВ СОСТОЯНИЙ СИСТЕМЫ: ПРАВИЛА УСПЕШНОГО ПРОВЕДЕНИЯ

*Жук Н.Н.*

Белорусский государственный педагогический  
университет имени Максима Танка

*Н.П. Радчикова*

кандидат психологических наук, доцент  
Белорусский государственный педагогический  
университет имени Максима Танка



Как следует из опубликованной в данном сборнике статьи Н.П. Радчиковой и Н.Н. Жук [2], анализ следов состояний системы (*State Trace Analysis*) как метод статистического анализа может составить альтернативу дисперсионному анализу, имеющему некоторые ограничения, которые не позволяют применять его в ситуациях, описываемых

нелинейными моделями, что в психологии встречается довольно часто.

Прежде чем рассмотреть основные приемы, позволяющие добиться удачного анализа следов состояний системы, стоит вкратце описать назначение и суть данного метода. Анализ следов состояний системы (АССС) является непараметрическим методом, который предназначен для установления того, одна или несколько промежуточных (латентных) переменных опосредуют связь между множеством независимых и множеством зависимых переменных. В понятиях существующих в когнитивной психологии теорий это означает решение вопроса о том, один или несколько внутренних механизмов лежат в основе работы когнитивной системы и отражаются в ее наблюдаемых проявлениях.

Размерность латентности, то есть число неявных механизмов, обеспечивающих работу системы, проверяется путем изменения независимых переменных, что делается с целью повлиять на латентные переменные.

Вызываемое таким образом «поведение» системы отображается в виде графика следов ее состояний (*state-trace plot*), анализ которого имеет в АССС принципиальное значение, так как именно по характеру графика можно судить о количестве действующих латентных факторов. Если данный график является монотонным, то работу системы определяет лишь один механизм, если же обнаруживается немонотонный характер графика, можно выдвигать предположение о действии более одного внутреннего механизма.

Таким образом, ключевая задача при проведении АССС заключается в определении монотонности графика. На самом деле, данная процедура не представляет сложности. Проиллюстрируем это на примере. Допустим, фактор состояния (*state factor*) имеет два уровня: точность восприятия объектов с невариативной формой и точность восприятия объектов с вариативной формой. Этот фактор будет откладываться по осям графика. Фактор размерности (*dimensional factor*) также представлен на двух уровнях: зрительное восприятие; зрительное и тактильное восприятие. Первый из этих уровней будет обозначен точками **a** и **b**, соединенными сплошной линией, второй уровень – точками **A** и **B**, которые будут соединены штриховой линией. У трассировочного фактора (*trace factor*) также имеется два уровня: короткое время предъявления стимулов, обозначаемое точками **a** и **A**; длительное время предъявления стимулов, обозначаемое точками **b** и **B**. Рассмотрим гипотетический график следов состояний системы для описанного в качестве примера случая (рис. 1) и попробуем оценить его на наличие монотонности. Очень легким и удобным способом проверки монотонности графика является проецирование его точек на ось X и на ось Y и сравнение порядков их следования по осям. Если порядок следования по двум осям одинаков, то кривая является монотонной.



Рис. 1. Гипотетический монотонный график следов состояний системы [4]

На рис. 1 очевидна монотонность графика, так как порядок следования спроецированных на ось X точек  $\{a, b, A, B\}$  такова же, как порядок следования точек по оси Y  $\{a, b, A, B\}$ .

Однако не всякий монотонный график обозначает, что мы имеем дело лишь с одним механизмом внутри «черного ящика». Так, на рис. 2 видно, что порядок следования точек графика по оси X такой же, как порядок следования этих же точек по оси Y -  $\{a, b, A, B\}$ . Но при этом график является порождением действия двух механизмов!

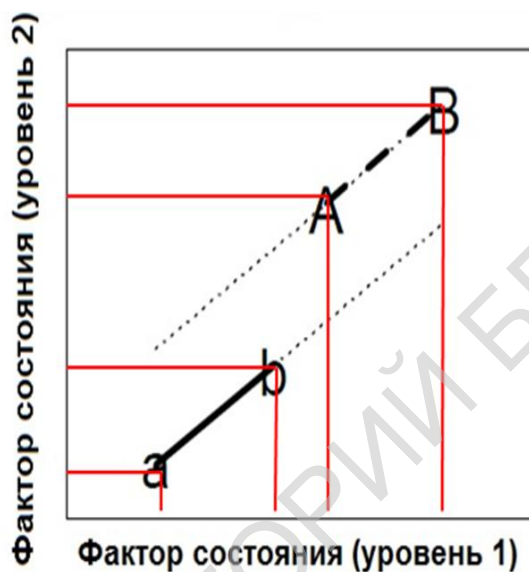


Рис. 2. Гипотетический монотонный график следов состояний системы, отображающий работу двух внутренних механизмов [4]

Чтобы на основании графика следов состояний системы делать однозначные выводы о размерности латентности, следует добиваться того, чтобы обозначаемые на графике отрезки перекрывались хотя бы по одной из осей, но лучше – по обеим. Так, если преобразовать график, изображенный на рис. 2, таким образом, что отрезки окажутся перекрытыми друг другом и по одной оси, и по другой (рис. 3), становится видно, что порядок следования точек по оси X  $\{A, a, B, b\}$  отличается от порядка их следования по оси Y  $\{a, A, b, B\}$ .

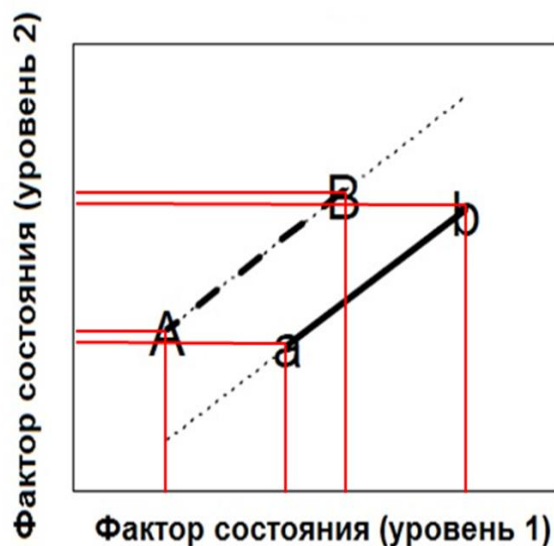


Рис. 3. Гипотетический немонотонный график следов состояний системы [4]

Теперь можно с уверенностью говорить о немонотонности графика и полагать, что функционирование системы, «поведение» которой отражено на графике следов ее состояний на рис. 3, обеспечивается работой нескольких механизмов.

Таким образом, задача исследователя, применяющего АССС, заключается в том, чтобы получить график следов состояний системы, удобный для выявления его монотонности или немонотонности. Решающую роль при этом играет выбор трассировочного фактора, или фактора следа. В конечном итоге именно в подборе данного фактора и заключается искусство проведения экспериментов, предполагающих использование метода АССС. Его успешность достигается благодаря учету и обеспечению выполнения трех условий:

- 1) выбор трассировочного фактора;
- 2) выбор значений уровней трассировочного фактора;
- 3) выбор количества уровней трассировочного фактора.

**В качестве трассировочного фактора** следует **выбирать** тот, который будет иметь монотонный эффект для каждого уровня фактора размерности. С целью пояснить, что подразумевается под этой рекомендацией, рассмотрим исследования Г.В. Лосика, А.В. Северина и Д.А. Пархоменко по изучению восприятия объектов с вариативной формой [1; 3]. В этих экспериментах в качестве трассировочного фактора можно ввести, например, время восприятия (предъявления) объекта испытуемым. Логично предположить, что чем это время больше, тем адекватнее получается образ воспринимаемого предмета. И это, по-видимому, верно для обеих уровней независимой переменной, выполняющей в рассматриваемых исследованиях роль фактора размерности: и для зрительного восприятия объектов, и для зрительно-тактильного

восприятия. Представим это схематически на графике следов состояний системы (рис. 4).

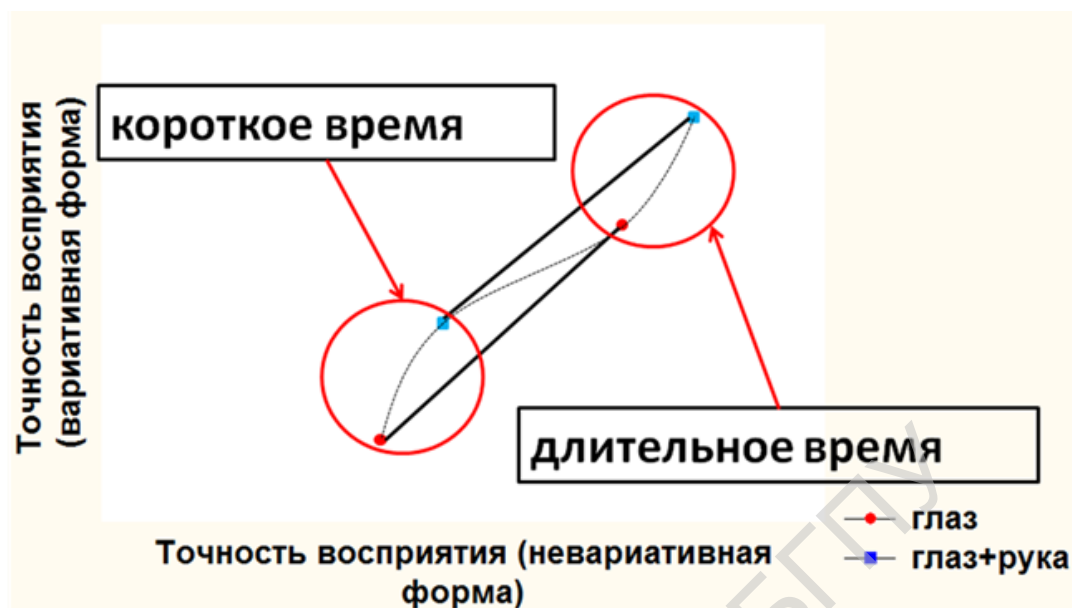


Рис. 4. График следов состояний системы: трассировочный фактор – время восприятия объектов

На рисунке отчетливо видно, что при увеличении времени предъявления объектов для восприятия испытуемыми точность возникающих образов объектов повышается, при этом неважно, какие модальности были задействованы при их восприятии: только зрительная или наряду с ней также тактильная модальность. Таким образом, время, отводимое испытуемому на восприятие объекта, оказывает одинаковое – т.е. монотонное - воздействие на эффективность обоих указанных способов перцепции.

*Значения уровней трассировочного фактора* должны *выбираться* таким образом, чтобы отрезки на графике следов состояний системы максимально перекрывались, и желательно по двум осям. Для иллюстрации воспользуемся данными исследования М. Persike, В. Meinhardt-Injac и G. Meinhardt, посвященного изучению точности воспроизведения перевернутых лиц [6]. Испытуемые должны были запоминать лица и объекты, сходные по сложности с человеческим лицом. В данном случае этими объектами были дома. И лица, и дома предъявлялись испытуемым как в обычном, так и в перевернутом виде. Последнее обстоятельство в описываемом исследовании можно рассматривать как проявление двух уровней фактора размерности. Здесь этот фактор, как это обычно бывает, влияет на каждое состояние системы одинаково. Например, когда испытуемый воспроизводит неперевернутые

объекты, то он делает это точнее, нежели в отношении перевернутых, причем неважно, что именно им воспроизводится: дома или лица (рис. 5).



Рис. 5. Точность воспроизведения неперевернутых и перевернутых объектов

Если в качестве трассировочного фактора воспользоваться временем, отводимым испытуемым на изучение предъявляемых им стимулов, то его увеличение одинаковым образом скажется на воспроизведении как обычных, так и перевернутых объектов, а именно, повысит его точность. Учитывая, что обычные объекты изначально вспоминались качественнее, естественно предположить, что и после увеличения времени экспозиции стимулов неперевернутые изображения по сравнению с перевернутыми будут воспроизводиться заметно лучше. Но при этом не будет достигнуто желаемое перекрытие отрезков (рис. 6а).

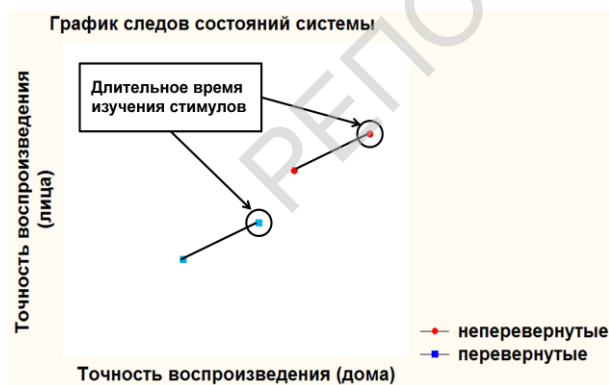


Рис. 6а. Точность воспроизведения объектов при длительном времени изучения стимулов

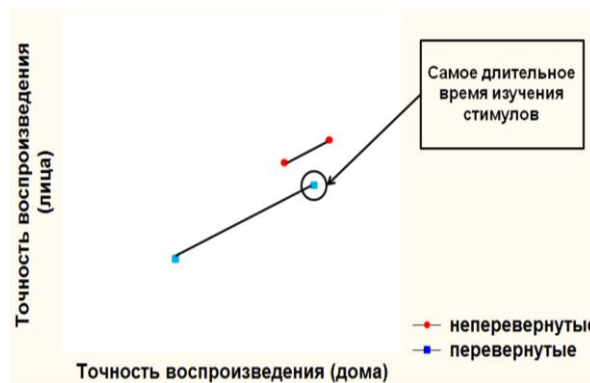


Рис. 6б. Точность воспроизведения перевернутых объектов при наиболее длительном времени изучения стимулов

Перекрытие отрезков можно максимизировать, выбрав разные уровни трассировочного фактора для разных уровней фактора размерности. В частности, если перевернутые стимулы запомнить труднее, чем обычные, то для изучения перевернутых объектов испытуемым следует предложить больше времени, чем для неперевернутых. Тогда процент правильных ответов для этих двух вариантов изображений станет примерно одинаков, и наверняка можно получить заметное перекрытие отрезков на графике следов состояний системы (рис. 6б). Но очевидно, что в таком случае не реализуется классическая в дисперсионном анализе полная факторная схема.

Так, А. Heathcote, S. Brown и M. Prince в исследовании, также посвященном изучению запоминания неперевернутых и перевернутых объектов [4], обычным изображениям отвели менее длительное время экспозиции (33-256 мс), а перевернутым – более длительное (256-2048 мс) и благодаря этому пришли к значительному перекрытию отрезков (рис. 7).

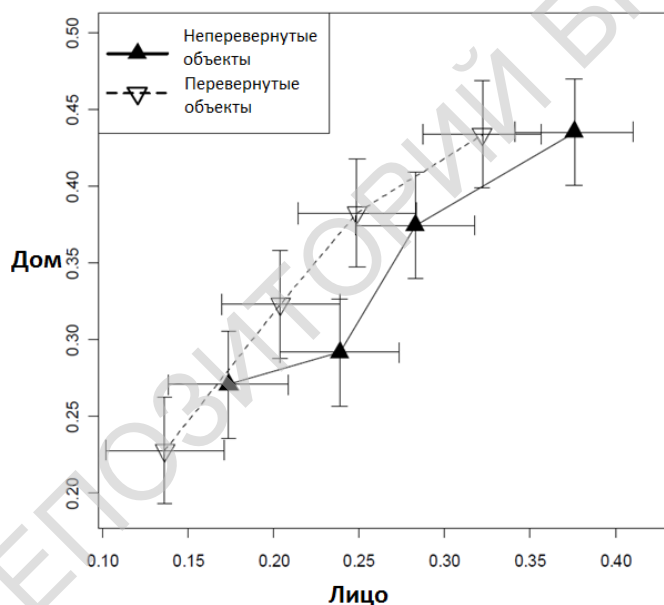


Рис. 7. График следов состояний системы с максимальным перекрытием отрезков [4]

Существует также *альтернативный подход к максимизации перекрытия отрезков графика* следов состояний системы. Если в дисперсионном анализе независимая переменная должна вызывать максимально возможную разницу в значениях зависимой переменной, то АССС построен на обратном принципе. Анализ следов состояний системы преследует цель уменьшить, насколько это возможно, различия в величине значений зависимой переменной, так как в этом заключается залог перекрытия отрезков графика. Исходя из сказанного, альтернативный способ усиления перекрытия отрезков представляет собой введение в экспериментальную схему

такой независимой переменной, которая приведет к сокращению различий между проявлениями зависимой переменной.

В качестве примера рассмотрим, к чему пришли в своем исследовании запоминания неперевернутых и перевернутых изображений G.R. Loftus, M.A. Oberg и A.M. Dillon [5], использовавшие не совсем удачный трассировочный фактор и не добившиеся перекрытия на графике отрезков. Стимулы, которые запоминали испытуемые, предъявлялись им затем для опознания все без исключения в обычном – неперевернутом - виде. Как известно, объект лучше узнается в том виде, в котором он запомнился человеку. Если учесть это, у авторов [5] неперевернутые изображения, которые в любом случае воспроизводятся точнее, получили дополнительное преимущество перед перевернутыми, вследствие чего уже имевшаяся до этого разница в правильности узнавания увеличилась еще больше.

С целью минимизации подобных различий уже упомянутые A. Heathcote, S. Brown и M. Prince [4] провели исследование, в котором все объекты при их последующем узнавании предъявлялись в перевернутом виде. В этом случае преимущество при опознавании имели перевернутые изображения. В результате исследователи пришли к тому, что точность ответов для последних повысилась, и на графике следов состояний системы появилось перекрытие отрезков (рис. 8).

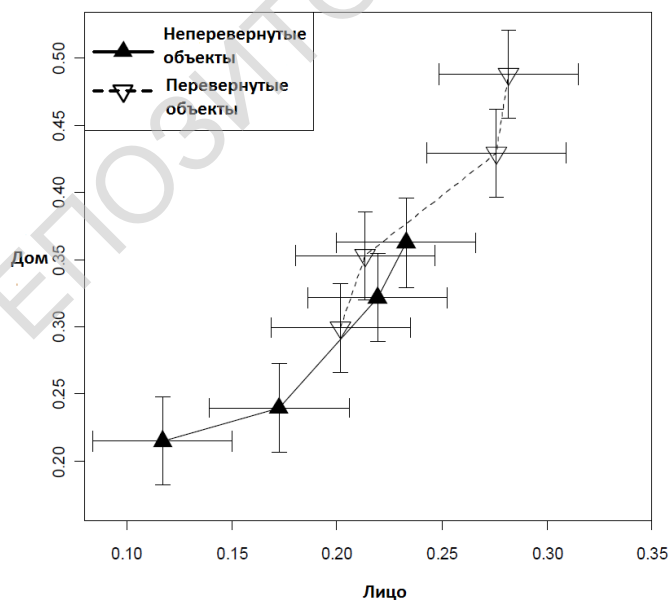


Рис. 8. График следов состояний системы при альтернативном подходе к максимизации перекрытия отрезков [4]

Искусство АССС, помимо всего прочего, заключается также в *определении количества уровней трассировочного фактора*. Как показывает



практика, выбрать их оптимальное число с первого раза удается далеко не всегда. Здесь важно не впасть в какую-либо из двух крайностей.

Если выделить слишком много уровней трассировочного фактора, как это сделали, по-видимому, G.R. Loftus, M.A. Oberg и A.M. Dillon [5], использовавшие 6 уровней, это потребует слишком большого количества экспериментальных проб для обеспечения требуемой точности измерения и серьезно повысит трудоемкость исследования. Стоит добавить, что, желая получить на графике максимальное перекрытие отрезков и взяв для этого 6 уровней трассировочного фактора – 6 значений времени предъявления стимулов (от 17 до 250 мс), вышеупомянутые авторы, как ни парадоксально, получили минимальное перекрытие.

Если же определить слишком малое число уровней трассировочного фактора, можно столкнуться с затруднениями при выявлении немонотонности графика следов состояний системы. На рис. 9 изображен график, построенный по результатам одного из экспериментов A. Heathcote, S. Brown и M. Prince, включающего в себя трассировочный фактор с достаточно большим количеством уровней – 4.

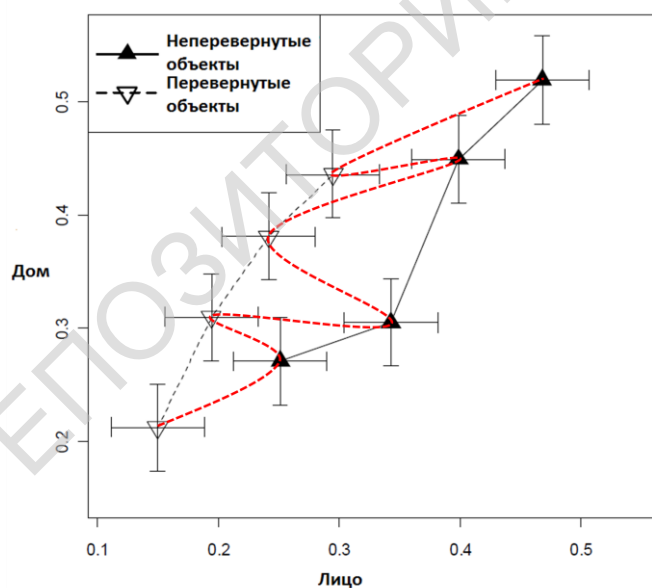


Рис. 9. Немонотонный график следов состояний системы при большом числе уровней трассировочного фактора [4]

Очевидно, что график следов состояний системы, полученный в данном случае (рис. 9), является немонотонным. Но когда в этом же исследовании количество уровней трассировочного фактора было уменьшено до двух, график приобрел явно монотонный характер (рис. 10), хотя до этого авторы A. Heathcote, S. Brown и M. Prince достоверно установили, что изучаемая ими и

отображаемая на графиках когнитивная система функционирует благодаря нескольким внутренним механизмам (рис. 9).

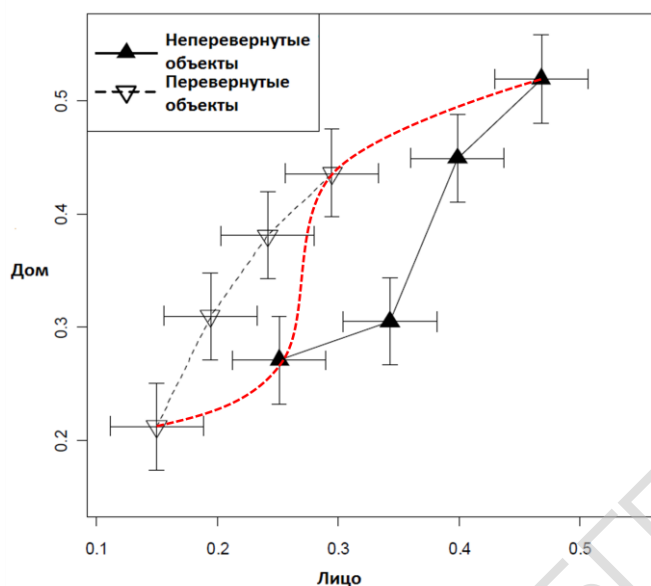


Рис. 10. Монотонный график следов состояний системы при небольшом числе уровней трассировочного фактора [4]

Хотя заранее трудно определить число уровней трассировочного фактора, но, по-видимому, их должно быть как минимум 3.

Проведение АССС с использованием графика следов состояний системы в качестве индикатора размерности ее латентности связано с еще одной **проблемой**. На графиках, представленных ранее (рис. 7-10), кроме точек, изображены также их **доверительные интервалы**. Как правило, сами по себе средние значения, получаемые в экспериментах, не особенно интересуют исследователей. Большой интерес представляют доверительные интервалы. Они задают для среднего область вокруг него, в которой с заданным уровнем доверия содержится «истинное» среднее генеральной совокупности.

Если в очередной раз обратиться к исследованию А. Heathcote, S. Brown и M. Prince [4], то построенный на основании полученных авторами данных график с учетом лишь средних значений представляет собой немонотонную кривую (рис. 11).

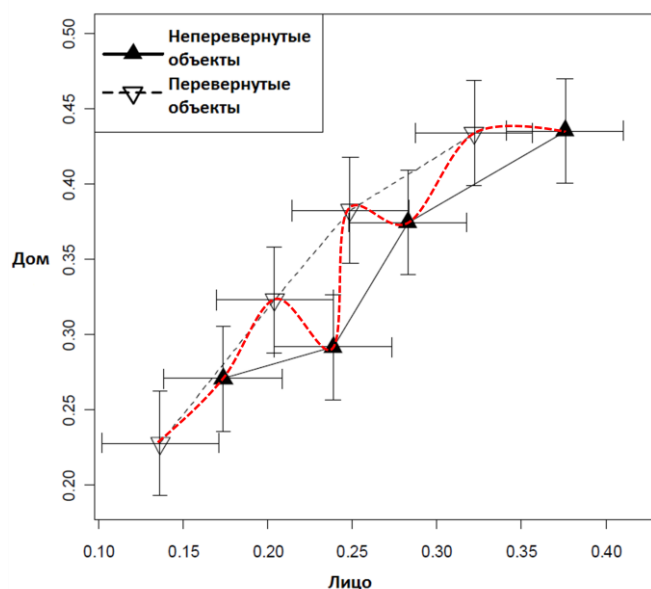


Рис. 11. Немонотонный график следов состояний системы (без учета доверительных интервалов) [4]

Но если обратить внимание на доверительные интервалы и учесть их при построении графика, то он приобретает монотонный вид (рис. 12).

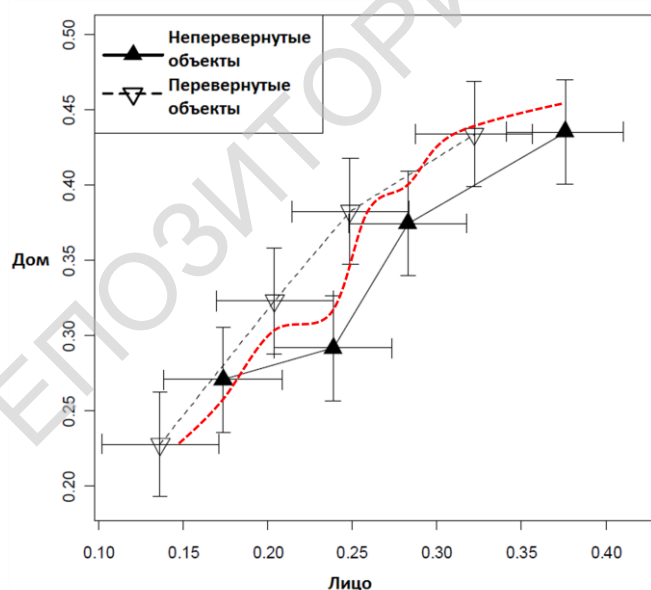


Рис. 12. Монотонный график следов состояний системы (с учетом доверительных интервалов) [4]

Чтобы сделать график более или менее однозначно интерпретируемым, т.е. решить проблему доверительных интервалов, можно увеличить, причем значительно, количество испытуемых, тогда, возможно, доверительные интервалы уменьшаться.

Подводя итог рассмотрения проведения АССС, можно сделать следующие *выводы*.

1. Эксперимент, результаты которого можно анализировать с помощью АССС, должен иметь, по крайней мере, трехфакторную схему.

2. Трассировочный фактор обычно не представляет научно-теоретического интереса, но включается в экспериментальную схему, чтобы получить график следов состояний системы с перекрывающимися по обеим осям отрезками, по которому можно определить размерность латентной системы.

3. Удачный (с перекрытием отрезков по обеим осям) график следов состояний системы требует внимательного выбора числа (по меньшей мере, трех) и значений уровней трассировочного фактора. И часто этого можно добиться только в неполной факторной схеме.

Имеются возможности анализа графиков следов состояний системы при помощи статистических методов. Однако они не реализованы в наиболее часто используемых в психологических исследованиях статистических пакетах. Зачастую, исследователи не одобряют применение традиционной логики проверки нуль-гипотезы по отношению к установлению монотонности графика следов состояний системы и предлагают для этого метод Байесова анализа, который нашел свою реализацию в статистическом пакете R.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лосик, Г.В. Полимодалное восприятие объектов с вариативной формой / Г.В. Лосик, Д.А. Пархоменко // Когнитивные штудии: актуальные проблемы когнитивной науки: материалы IV междисциплин. семинара. Вып. 4 / под ред. А.П. Лобанова, Н.П. Радчиковой. – Минск: БГПУ, 2013. – С. 51-60.
2. Радчикова, Н.П. Анализ следов состояний системы как альтернатива дисперсионному анализу / Н.П. Радчикова, Н.Н. Жук // Когнитивные штудии: актуальные проблемы когнитивной науки: материалы VI междисциплин. конференции. Вып. 5 / под ред. А.П. Лобанова, Н.П. Радчиковой. – Минск: БГПУ, 2015. – С. 170-183.
3. Северин, А.В. Модель перцептивного действия при восприятии объектов вариативной формы / А.В. Северин // Вести БГПУ. – 2013. – № 2 (76). – С. 51-56.
4. Heathcote, A. The Design and Analysis of State-Trace Experiments / A. Heathcote, S. Brown, M. Prince // Psychological Methods. – 2012. – Vol 17(1),. – P. 78-99
5. Loftus, G.R. Linear theory, dimensional theory and the face-inversion effect / G.R. Loftus, M.A. Oberg, A.M. Dillon // Psychological Review. – 2004. – Vol. 111. – No. 4. – P. 835-863.
6. Persike, M. The face inversion effect in opponent-stimulus rivalry / M. Persike, B. Meinhardt-Injac, G. Meinhardt // Frontiers in Human Neuroscience, published online 2014 May 15. doi: 10.3389/fnhum.2014.00295.