

УДК 159.9.019

РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПА АНАЛИЗА ДИНАМИКИ ПСИХОФИЗИЧЕСКОГО ПОКАЗАТЕЛЯ d' С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА “СКОЛЬЗЯЩЕГО ОКНА”¹

© 2024 г. В. В. Апанович^{1,2,3,*}, К. С. Юдаков^{1,2,**}, П. И. Егорова^{1,***}

¹ФГБОУ ВО “Государственный академический университет гуманитарных наук”;
119049, г. Москва, Маролевский пер., д. 26, Россия.

²ФГБУН Институт психологии РАН;
129366, г. Москва, ул. Ярославская, д. 13, корп. 1, Россия.

³ФГАОУ ВО “Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”;
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20, Россия.

*Кандидат психологических наук, доцент, научный сотрудник лаборатории психофизиологии
им. В.Б. Швыркова, младший научный сотрудник международной лаборатории социальной нейробиологии.
E-mail: apanovitschvv@yandex.ru

**Магистрант факультета психологии, младший научный сотрудник лаборатории
психофизиологии им. В.Б. Швыркова.

E-mail: kost05062000@mail.ru

***Магистрант факультета психологии.
E-mail: polina.egorova2102@gmail.com

Поступила 29.05.2024

Аннотация. В статье описываются возможности применения метода “скользящего окна” при анализе психофизических показателей на примере показателя d' , используемого в методике “Да/Нет”, основанной на Теории обнаружения сигнала. Рассматриваются общие принципы применения метода “скользящего окна” к психофизическому показателю d' , а также особенности его использования. Описываются способы, позволяющие проверять основные предположения, заложенные в модели Теории обнаружения сигнала, но применительно к динамическим данным. Разбираются некоторые возможные задачи, решение которых становится доступным при применении данного метода анализа.

Ключевые слова: метод “скользящего окна”, анализ временных рядов, психофизика, теория обнаружения сигнала, метод “Да/Нет”, показатель d' .

DOI: 10.31857/S0205959224050082

Традиционные психофизические методики и используемые ими показатели применяются как в классической психофизике (психофизике I), так и в современной, субъектной психофизике (психофизике II).

Среди них выделяется методика² “Да/Нет” [9], основанная на Теории обнаружения сигнала [21]. Данная методика применялась в психофизических

исследованиях, направленных на исследование факторов, опосредующих решение психофизической задачи (см., например, [16]).

Стоит отметить, что современный этап развития науки характеризуется возрастанием взаимовлияния различных ее областей и расширяющимися междисциплинарными связями. Оригинальное применение инструментов и методов одной научной области может способствовать решению задач другой области (например, [20]). При этом современная методология уделяет большое внимание исследованию отношений порождения [1], что с позиций психологии может быть операционализировано в том числе как исследование процессов научения и требует анализа не только статической, но и динамической составляющей используемых

¹ Исследование поддержано грантом РНФ № 23-18-00473 (Институт психологии РАН).

² Здесь и далее используется термин “методика” для дифференцирования метода как способа познания (индуктивного или дедуктивного) от более конкретизированных инструментальных процедур, позволяющих проводить конкретно-научное изменение.

показателей (например, см. представления о недизъюнктивности мышления А.В. Брушлинского [5]). В данной статье рассмотрены возможности применения методики “Да/Нет” и ее основного показателя d' для исследования научения в контексте обозначенной выше проблемы. Хотя стоит отметить, что данный подход может найти свое применение и для решения других задач, требующих анализа динамической составляющей специфических психофизических показателей.

МЕТОДИКА “ДА/НЕТ” И ТЕОРИЯ ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛА

Психофизическая методика “Да/Нет” построена на последовательном предъявлении пустых и сигнальных проб. Сигнальными называются пробы, в которых предъявлялся сигнал, отличный от эталонного; пробы, в которых предъявляемый сигнал не отличается от эталонного, называются пустыми [2; 9]. Порядок предъявления проб определяется квазислучайным образом, и вероятность предъявления сигнальной пробы задается экспериментатором в зависимости от цели исследования; стандартной вероятностью принято считать 50%. Задача участника исследования — определить, предъявлялась ли ему пустая или сигнальная проба.

В Теории обнаружения сигнала [21], которая лежит в основе методики “Да/Нет”, предполагается наличие двух факторов, опосредующих решение задачи: “показателя чувствительности” (как правило — показатель d') и “критерия принятия решения” (β), который определяет субъективную

установку участника исследования чаще использовать одну или другую категории ответа (был сигнал/не было сигнала). Принято считать, что первый из этих показателей является относительно устойчивым показателем у одного и того же индивида [4], тогда как критерий принятия решения может произвольно меняться участником исследования в зависимости от условий задачи [15]. Традиционными инструментами исследователя для влияния на критерий являются изменение априорной вероятности предъявления сигнальной пробы, введение платежных матриц, а также инструкция испытуемому [2; 9].

Модель оценки вышеуказанных параметров базируется на представлении о том, что “один и тот же стимул, повторяясь в различных пробах, вызывает различные сенсорные образы, так что в каждой отдельной пробе можно говорить только о вероятностях возникновения тех или иных образов” [9, с. 86], т.е. индивид достигает различный результат, описываемый как различные ощущения, возникающие при предъявлении одного и того же сигнала. Такого рода различия описываются через два пересекающихся нормальных распределения, одно из которых соответствует “распределению ощущений на пустую пробу” (кривая $f(x/n)$; от англ. N — Noise, шум), а второе — “распределению ощущений на сигнальную пробу” (кривая $f(x/s)$; S — Signal, сигнал), и данные кривые имеют различные математические ожидания, т.е. смещены друг относительно друга (рис. 1). Низкий уровень смещения создает существенные области перекрытия между двумя кривыми. Так как участнику исследования предлагается отвечать либо о наличии, либо об отсутствии сигнала (исключаются промежуточные

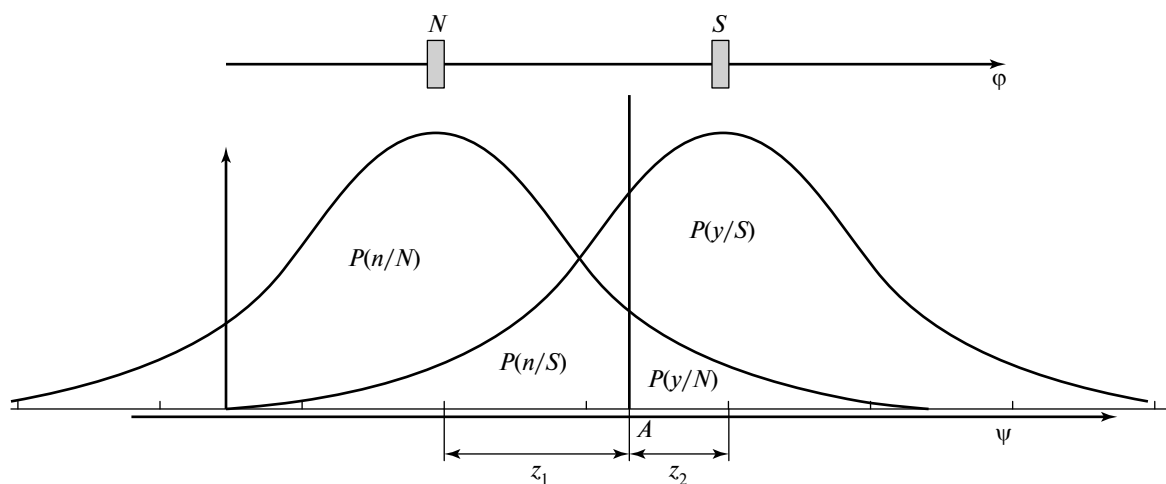


Рис. 1. Графическое отображение модели Теории обнаружения сигнала:

N — пустая проба; S — сигнальная проба; $P(y/S)$ — вероятность ответа “да” на сигнальную пробу; $P(n/N)$ — вероятность ответа “нет” на пустую пробу; $P(n/S)$ — вероятность ответа “нет” на сигнальную пробу; $P(y/N)$ — вероятность ответа “да” на пустую пробу

варианты, например “не знаю” или “сомневаюсь”), такая двухкатегорийная процедура вынуждает участника исследования принимать однозначное решение, что представлено по модели критерием принятия решения (точка A на рис. 1).

Относительно двух распределений и критерия принятия решения все ответы участника исследования делятся на четыре категории, традиционно именуемые в психофизике следующим образом:

- Y/s — обнаружение (ответ “да”, когда был сигнал);
- N/s — пропуск (ответ “нет”, когда был сигнал);
- Y/n — ложная тревога (ответ “да”, когда сигнала не было);
- N/n — правильное молчание (ответ “нет”, когда сигнала не было).

Рассчитанные на основе эмпирических данных значения вероятностей ответов обнаружения и ложных тревог позволяют исследователю определить положение критерия принятия решения относительно математического ожидания одного из двух распределений. Таким образом, в отличие от классических представлений Фехнера, данная модель не описывает переход от одного ощущения к другому в терминах порогов, а базируется на том, что данный переход носит континуальный характер без выделения понятия порога как онтологизированного конструкта [22].

Зависимость между вероятностью обнаружения — $P(Y/s)$ и вероятностью ложной тревоги — $P(Y/n)$ является основной характеристикой решения задачи [2]. Варьирование условий обнаружения сигнала позволяет получить несколько разных соотношений вероятностей ответов “да” для ситуаций наличия или отсутствия сигнала. Построив кривую по нескольким точкам с координатами ($P(Y/s)$, $P(Y/n)$), исследователь получает “рабочую характеристику приемника”³ (РХП). Традиционно целью применения метода “Да/Нет” и является построение РХП, которая позволяет изучать способность наблюдателя к обнаружению или различению сигналов.

Возможность обнаружения сигнала (оцениваемую через показатель d'), согласно этой модели, зависит от области перекрытия двух функций плотности нормального распределения. В случае уменьшения вариативности (дисперсии) при сохранении расстояния между математическими ожиданиями

вышеописанных распределений область перекрытия двух функций значительно уменьшается, что с позиций внешнего наблюдателя фиксируется как уменьшение вероятности ошибки. Показатель d' определяется как разность математических ожиданий двух распределений относительно стандартного отклонения данных распределений (при соблюдении предположения о том, что стандартные отклонения распределений равны). Таким образом, показатель $d' = (m_s - m_n)/\sigma$, выраженный в z -оценках, вычисляется по формуле $d' = z_n - z_s$.

Важным преимуществом показателя d' является также его независимость от критерия принятия решения. Процент правильных ответов в случае существенного отклонения критерия принятия решения от критерия принятия решения так называемого идеального наблюдателя является нерепрезентативным с позиций выбранной модели [10], поэтому в качестве основного показателя нами и был выбран d' .

В случае если распределения отличаются от нормальных или же в случае различий стандартных отклонений данных распределений, применяются другие показатели для оценки чувствительности наблюдателя, например Δm .

Таким образом, в рамках Теории обнаружения сигнала возможность обнаружения в зависимости от свойств сигнала и шума определяется с помощью показателя d' . Традиционно считается, что он остается достаточно постоянным у одного и того же наблюдателя [22], однако в литературе также описываются и случаи его изменения, например, в результате резкого изменения интенсивности сигнала или свойств шума (см.: [2]).

Однако в исследованиях было показано, что данный показатель также может обладать динамикой, например, в наших предыдущих исследованиях процессов научения [8]. Показатель d' нами понимается как показатель текущей результативности, анализ динамики которой является одним из ключевых аспектов данных исследований. Отличие рассмотрения d' как динамического показателя основано на том, что получаемые в психофизических экспериментах данные отражают не столько объективные характеристики сенсорной системы человека, “чистые ощущения”, сколько “режимы работы наблюдателя”, определяемые внесенсорными факторами, индивидуальными особенностями, в том числе наученностью, а также спецификой деятельности.

Также стоит отметить, что, несмотря на доминирующее понимание показателя d' как статичной величины, в литературе уделяется внимание факту

³ Формулировка приведена в соответствии с классической терминологией; под приемником понимается индивид, вовлекающийся в решение психофизической задачи.

процесса научения психофизической задаче как в техническом смысле — обучение испытуемого перед прохождением основных серий [9], так и в плане выявления самостоятельной феноменологии: “сенсорное обучение” [11].

Современное понимание механизмов, связанных с процессом “восприятия”, позволяет применять уже ставшие традиционными для их изучения методы и показатели в новых условиях, обогащая теоретическое содержание и практическое применение этих методов, а также для решения задач, поставленных в рамках других теоретических подходов.

МЕТОД “СКОЛЬЗЯЩЕГО ОКНА”

В литературе психофизические показатели, представленные в Теории обнаружения сигнала, рассматриваются как стационарные и характеризующие стабильные характеристики наблюдателя [4]. Однако же встречаются работы, где описывалась их нестабильность, но достаточное внимание этому феномену не уделялось. В данных исследованиях большее внимание уделялось такому фактору, как критерий принятия решения β [3; 6; 12], однако имеются и работы, в которых анализировалась нестабильность показателя d' . Было показано, что показатели чувствительности [7; 13] меняются как у “наивных испытуемых”, так и у опытных испытуемых. Они могут быть подвержены периодическим колебаниям, в том числе в исследованиях, проводящихся в режиме непрерывной деятельности [18]. Такие колебания регистрировались, как правило, при сравнении экспериментальных серий (представленными блоками или сутками регистрации), что позволяет делать вывод об изменении показателя d' , но не позволяет раскрыть процессуальный анализ его динамики.

В связи с этим ставится вопрос о надежности применения психофизических показателей в случае работы с наивными испытуемыми [14] в контексте возможности “объединять индивидуальные данные в общий массив при обработке результатов” [Там же, с. 134]. Для преодоления этой проблемы, а также для возможности более детального анализа динамического аспекта показателя d' предлагается следующий методический прием.

Применение метода “скользящего” окна для анализа показателя d' . Для изучения процессуальной характеристики показателя d' стандартный метод усреднения по отдельным сериям не подходит, потому что он не позволяет учитывать динамику показателя внутри серий. Уменьшение эпохи

усреднения показателя d' может приводить к его нестабильности и в крайних случаях — к ситуациям невозможности его расчета (в случае отсутствия ошибочных ответов на пустую и/или сигнальную пробу). Для оценки динамики предлагается использовать метод “скользящего окна” (Moving Average). Он предполагает последовательное выделение эпох для анализа заданного диапазона (ширина окна) в рамках временного ряда, а затем смещение этого диапазона на указанное количество точек или же проб (шаг окна). То есть окно фиксированного размера перемещается по временному ряду с определенным шагом. Соотношение шага к ширине окна определяет пересекаемость двух соседних окон усреднения и измеряется в диапазоне от 0 до 1. В том случае, когда шаг окна незначительно отличается от ширины окна, пересекаемость низкая. Наблюдаемая динамика обладает более высокой интенсивностью, однако такой метод не позволяет детектировать незначительную по своей продолжительности динамику. Более чувствительным к краткосрочной динамике является вариант минимизации шага окна относительно его ширины. Однако в таком случае наблюдаемая динамика сильно “сглаживается” в силу высокой пересекаемости соседних окон.

Выбор ширины окна и шага сильно зависит от исследовательских задач. Несмотря на то что традиционно в литературе считается, что для получения стабильного показателя d' необходимо брать диапазон в 200–400 проб [9], для оценки динамики такие окна усреднения выглядят неоправданно завышенными. Также применительно к показателю d' стоит заметить, что уменьшение ширины окна не позволяет работать с высокими значениями показателя d' ввиду увеличения вероятности отсутствия ошибок на пустую или сигнальную пробу. В том случае, если экспериментом предполагается, что критерий принятия решения идеального наблюдателя сбалансирован, и при допущении о том, что ответы испытуемого соответствуют ответам так называемого идеального наблюдателя, можно построить кривую зависимости математических ожиданий необходимого количества проб от показателя d' , которые демонстрирует испытуемый в эксперименте. Под идеальным наблюдателем подразумевается минимизация ошибок каждой из двух ошибочных категорий ответа (ложные тревоги и пропуск сигнала, т.е. соответствие критерия принятия решения β критерию при минимизации ошибок — в нашем случае с равновероятным предъявлением сигналов и симметричными платёжными матрицами равноудаленность относительно математических ожиданий распределений ощущений на пустую и сигнальную пробы).

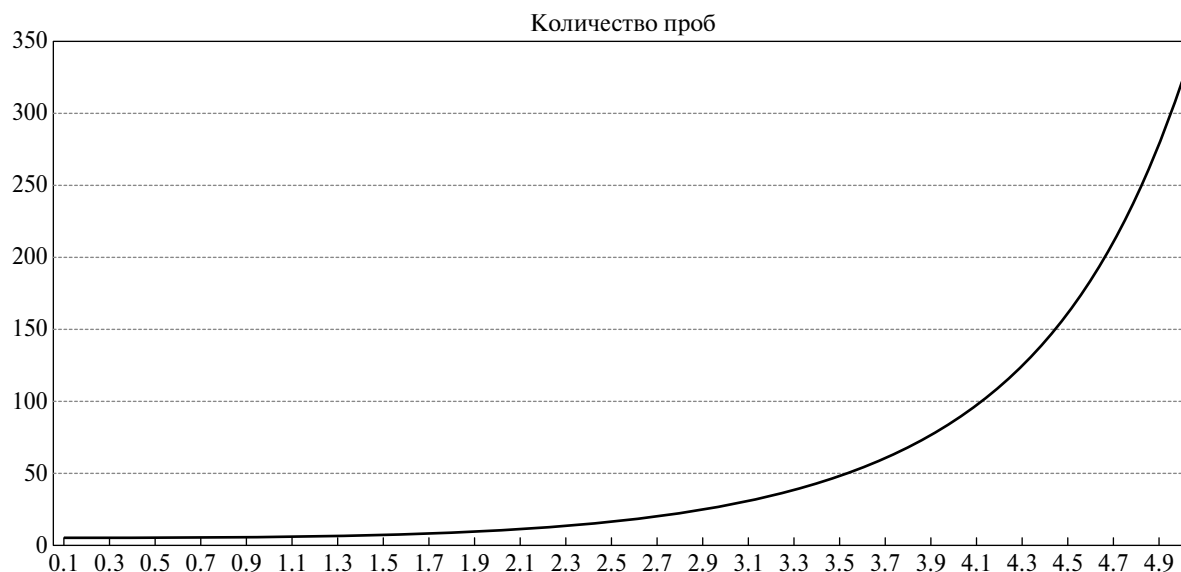


Рис. 2. Зависимость математических ожиданий необходимого количества проб для возможности расчета основных психофизических показателей (d' , β) от ожидаемого в эксперименте показателя d' при условии сбалансированного критерия принятия решения (β)

Как можно увидеть из рис. 2, для экспериментов, предполагающих значение показателя d' не выше 3.5, достаточным будет являться 50 проб для расчета показателя d' . Дальнейшие примеры работы “скользящего окна” будут приводиться с параметрами: “ширина окна” — 50 проб и “шаг окна” — 1 проба (рис. 3).

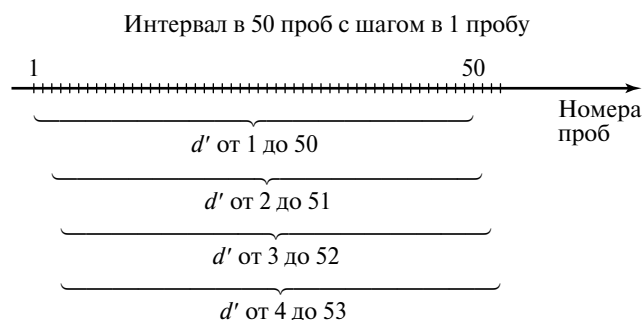


Рис. 3. Иллюстрация принципа скользящего окна с размером окна в 50 проб и шагом в 1 пробу

Ввиду относительно небольшого количества проб, взятых для расчета показателя d' , и высокой чувствительности данного метода каждая короткая случайная последовательность одинаковых ответов создает незначительные нестационарные колебания в результатах. Опираясь на классические представления теории тестирования в психологии о надежности измерения [17], можно предполагать, что такого рода нестационарные колебания описываются как психометрический шум. Для снижения влияния данных незначительных колебаний на результаты измерения методом “скользящего окна” нами предлагается использовать

метод сглаживания Гаусса с шириной окна, задаваемой исследователем (примеры сглаженных и не-сглаженных кривых см. на рис. 4). Ширина окна позволяет задавать уровень сглаживания, в данном примере она была равна 7 точкам для исключения высокочастотных колебаний. С увеличением ширины окна будет уменьшаться и информативность анализируемых кривых.

Проверка соответствия распределения нормальному. Показатель d' является параметрическим, и его применение допускается только при отсутствии отличий распределений ощущений на пустую и сигнальную пробы от нормального. Традиционно проверка происходит следующим образом: проводится около 5–7 серий [9], в которых инструкцией или экспериментально изменяется критерий принятия решения. Далее по каждой из серий рассчитываются z -координаты критерия принятия решения, z_1 и z_2 сопоставляются по коэффициенту корреляции Пирсона. В случае с “наивными испытуемыми”, когда условия эксперимента не позволяют задавать изменения критерия принятия решения, такая проверка может быть невозможной. Для чего была разработана иная процедура.

Для каждого участника исследования по коэффициенту корреляции Пирсона сравнивались z -координаты критерия принятия решения в точках с одинаковым значением показателя d' в разные отрезки всей экспериментальной процедуры. Для каждого участника исследования проводилось три сравнения по следующим эпохам: медианное значение показателя d' и 1-й и 3-й квартили распределения показателя d' по всей экспериментальной

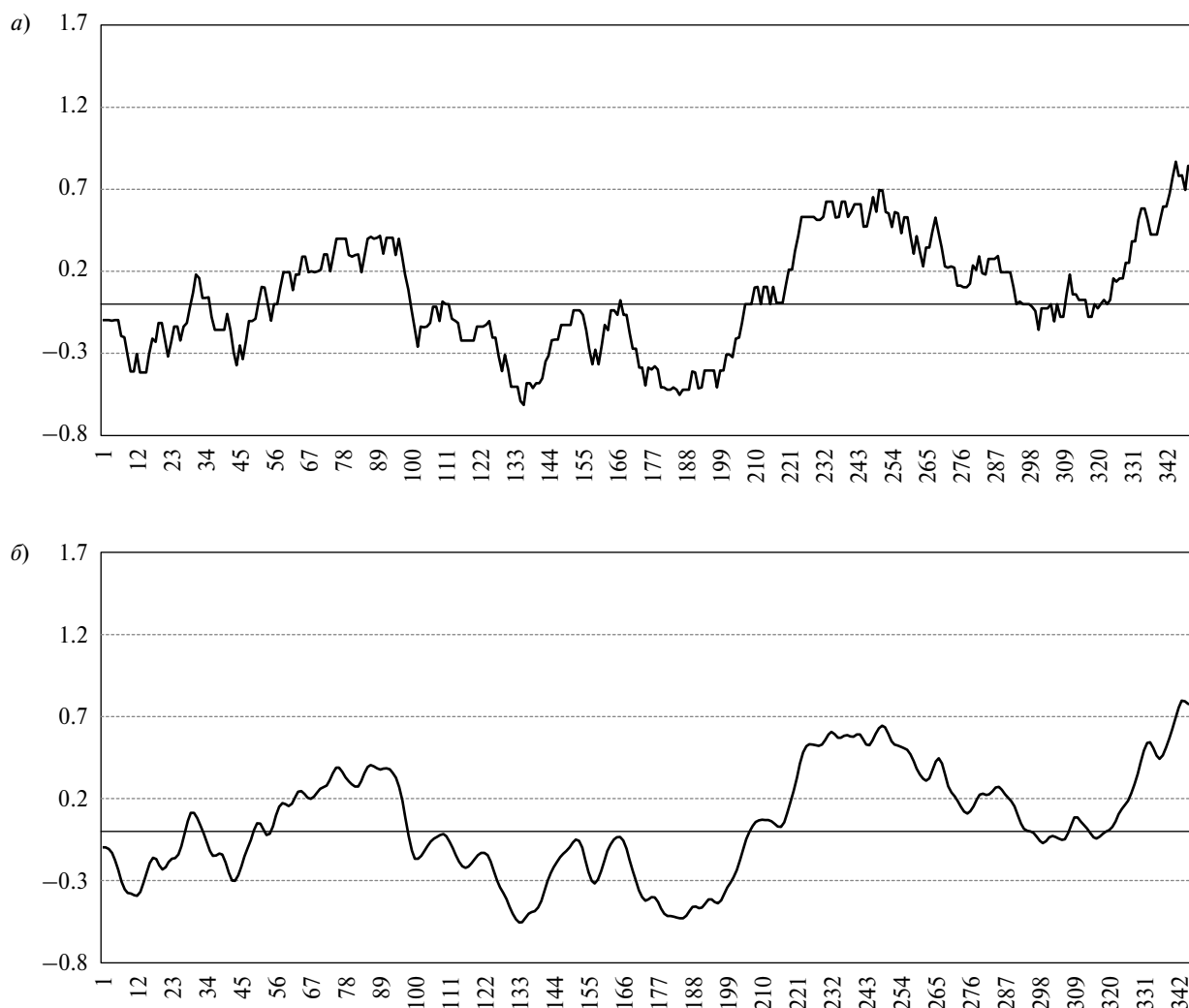


Рис. 4. Пример первичных данных (а) и сглаженных (б) по методу Гаусса

процедуре. В анализ включались значения из непересекающихся эпох во избежание связности сравниваемых значений.

На примере исследования [19] с выборкой 28 человек было показано, что корреляции между указанными значениями находятся на высоком уровне. Для медианных значений минимальная корреляция была равна 0.945, для первого квартиля — 0.913, для третьего — 0.963. Все корреляции были достоверными при уровне значимости $p \leq 0.05$. Таким образом, можно говорить о том, что для разных диапазонов показателя результативности d' соблюдалось линейное изменение z_1 и z_2 , что позволяет делать вывод о том, что динамические ряды результативности решения психофизической задачи позволяют применять параметрическую статистику в виде показателя d .

Аналогичным образом возможно и проведение второй проверки: равенства дисперсий двух распределений. Для проверки используется стандартный

метод [9], в качестве данных для которого применяется тот же принцип отбора данных: сравнивались z -координаты критерия принятия решения в точках с одинаковым значением показателя d' в разные отрезки всей экспериментальной процедуры. Между соответствующими столбцами z -значений рассчитывалось линейное уравнение, на основе которого получали значения Δz , равенство которых по модели Фишера свидетельствовало о единой единице измерения (единице стандартного отклонения, статистически равной для обоих распределений), т.е. угол наклона рассчитанной по данным прямой не должен отличаться от единицы.

С использованием того же набора данных [19] было показано, что достоверных отличий между Δz не наблюдается. Для медианных значений угол наклона прямой находился в диапазоне от 0.84 до 1.11, уровень значимости не опускался ниже 0.83. Для 1-го квартиля угол наклона прямой находился в диапазоне от 0.90 до 1.12, уровень

значимости не опускался ниже 0.87. Для 2-го квартиля угол наклона прямой находился в диапазоне от 0.84 до 1.19, уровень значимости не опускался ниже 0.83. Таким образом, можно говорить о том, что для разных диапазонов показателя результативности d' соблюдается требование равенства дисперсий, что также позволяет делать вывод о том, что динамические ряды результативности решения психофизической задачи позволяют применять параметрическую статистику в виде показателя d' .

Стоит обратить внимание на то, что в традиционных психофизических исследованиях, предполагающих изменение β , динамика z -координат является более выраженной. В том случае, когда исследователь берет произвольные эпохи (с равными показателями d'), такая динамика носит произвольный характер, и высокий уровень корреляции говорит о том, что даже стохастические изменения параметров модели служат аргументом в пользу нормальности распределения “показателей ощущений” на пустую и сигнальную пробы.

ПРИМЕРЫ ЗАДАЧ, КОТОРЫЕ ПОЗВОЛЯЕТ РЕШАТЬ МЕТОД “СКОЛЬЗЯЩЕГО ОКНА” ПРИ АНАЛИЗЕ ПОКАЗАТЕЛЯ d'

Применение принципа “скользящего” окна при анализе показателя d' позволяет решать новые задачи, недоступные напрямую при помощи традиционных методов. В этом разделе будут приведены примеры постановки таких задач с предполагаемыми способами решения и способами применения принципа “скользящего окна” в психофизических исследованиях.

Оценка дискретного или непрерывного характера изменения показателя d' при анализе его динамики в ходе исследования. Как отмечалось выше, при стремлении к нулю соотношении шага окна к ширине окна динамика показателя d' существенно сглаживается, что можно было увидеть на рис. 4. При анализе интенсивности этой динамики можно проверить гипотезу относительно дискретности/непрерывности изменения показателя d' .

Дополнительно в качестве особенности данного метода можно выделить следующее: при дискретном изменении показателя d' (например, с 1-й по n -ю пробу участник не различает сигналы, а с $n + 1$ -й пробы начал различать) рост показателя d' будет отображаться плавным. Для различения дискретного или непрерывного изменения показателя d' разработана следующая процедура.

Учитывая, что в каждой пробе показатели $P(y/N)$ и $P(y/S)$ могут изменяться только на $1/50$ (в силу сдвига окна на 1 пробу из 50), можно рассчитать теоретическую величину $X_{\text{теор}}$ того, сколько сдвигов “скользящего окна” является необходимым минимумом для перехода между двумя точками показателя d' , и сопоставить ее с реальным количеством переходов “скользящего окна”, наблюдаемом в эмпирических данных ($X_{\text{эмп}}$). Далее возможно применение статистики χ^2 по стандартной формуле

$$\chi^2_{\text{эмп}} = (X_{\text{теор}} - X_{\text{эмп}})^2 / X_{\text{эмп}}$$

с одной степенью свободы (имеющей критическое значение по модели Неймана—Пирсона при $\alpha = 0.05$, равное 3.841, или позволяющей находить уровень значимости по модели Фишера).

Таким образом, рассматривая участников исследования из разных групп или в разных экспериментальных условиях, на основании данного метода возможно проводить оценку того, является ли динамика показателя d' дискретной или непрерывной.

Оценка стабильности показателя d' при использовании принципа “скользящего окна”. Как было показано выше, показатель d' подвержен колебаниям, и отдельной задачей является оценка наличия/отсутствия его динамики на том или ином промежутке экспериментальной серии. В случае стабильных показателей d' на графике “скользящего окна” будут наблюдаться незначительные колебания, но не будет наблюдаться трендов возрастания или убывания. Нами для решения данной задачи предлагается метод расчета “плато”, которое свидетельствует о стабильности показателя d' .

Метод предполагает оценку различий соседних точек показателя d' относительно реперной и выбираемой экспериментатором, исходя из задач исследования. Например, относительно первой точки во временном ряду (рассмотрим описанный выше пример с расчетом показателя d' по 50 пробам и принципом “скользящего окна” с шагом в 1 пробу) алгоритм нахождения “плато” и его границ выглядит следующим образом: значение первого показателя d' (рассчитанного с 1-й по 50-ю пробы) сравнивается со вторым (со 2-й по 51-ю пробу) по t -критерию Стьюдента. При отсутствии значимых различий для уменьшения (по сравнению с рассчитываемым показателем d' по 50 пробам) вклада психометрического шума показателя d' показатель рассчитывается на увеличенном интервале: с 1-й по 51-ю пробу, и он сопоставляется со следующим по счету показателем, рассчитываемым на интервале с 3-й по 52-ю пробу. Данная процедура повторяется до тех пор, пока очередной

по счету показатель d' не начинает достоверно отличаться от показателя d' , рассчитанного на диапазоне с 1-й по $50 + n$ пробу. Метод прямого усреднения первых k показателей d' является некорректным в силу существенного пересечения усредняемых эпох.

В случае отсутствия различий проанализированный диапазон рассматривается как диапазон стабильных значений показателя d' , дающий основание считать показатель стабильным на всем оцениваемом по данной процедуре диапазоне (для всех проб, вошедших в данный диапазон). В случае обнаружения достоверных различий на некоей точке анализа процедура заканчивается, и эта точка анализа выступает в качестве границы стабильного “плато”. В диапазоне “плато” рассчитывается показатель d' , характерный для испытуемого в указанном диапазоне проб.

Что важно, при расширении диапазона расчета показателя d' снижается его стандартная ошибка, что приводит к увеличению мощности t -статистики и позволяет с большей вероятностью отклонить нулевую гипотезу об отсутствии различий на следующем этапе.

Оценка принадлежности единичного показателя d' к распределению показателей d' в другом диапазоне. Помимо определения стабильных эпох показателя d' при работе с динамическими рядами может появляться противоположная задача, а именно задача демонстрации неслучайности наблюдаемой динамики (к примеру, неслучайный рост показателя d' , свидетельствующий о научении испытуемым психофизической задаче).

Модель распределения показателя d' предполагает нормальность распределения в соответствии с данными литературы, что также подтверждается эмпирически (см. раздел “Проверка соответствия распределения нормальному”). Параметры нормального распределения могут задаваться в зависимости от исследовательских задач. Так, нами выдвигались два типа параметров: основанные на константных значениях и взятые из эмпирических данных. В том случае, если показатель выходит за пределы модели, т.е. превышает 95-й перцентиль, задаваемый моделью, можно делать вывод о том, что анализируемое значение показателя d' не относится к совокупности, предполагаемой моделью (5% наиболее экстремальных наблюдений можно рассматривать как не принадлежащие к этому распределению).

К примеру, для ответа на вопрос, решает ли испытуемый задачу случайным образом, возможно задавать модель нормального распределения

показателя d' , среднее значение которого равно нулю (полная степень неразличимости пустой и сигнальной проб), и анализировать, попадает ли анализируемый показатель d' в диапазон от 0 до 95-го перцентиля. Стандартное отклонение рассчитывается по стандартной формуле [9], и оно умножается на значение z -координаты нормального распределения, соответствующей 95-му перцентилу (в данном случае — 1.64, так как проверяется односторонняя гипотеза).

Примеры применения такого рода задач можно рассмотреть в контексте проблематики научения. Выход за пределы околонулевого диапазона можно интерпретировать как приобретение нового навыка. В случае с вышеописанным примером, описывающим “скользящее окно” с эпохой усреднения по 50 пробам и шагом в 1 пробу, модели будут выглядеть следующим образом.

Математическое ожидание нормального распределения задается на нулевом значении, для 50 проб (и допущении об оптимальности наблюдателя) вероятности $P(y/S)$ и $P(y/N)$ будут равными и иметь значения 0.5. Соответственно, z_1 и z_2 равны нулю. Исходя из этих значений $\sigma_{d'} = 0.3327$. Максимальные 5% наблюдений находятся выше точки, равной 1.64 единицы стандартного отклонения, т.е. $1.64 \cdot 0.3327 = 0.546$. Если значение показателя d' превышает 0.546, принимается, что задача решается не случайным образом. В случае если показатель d' находится выше этих значений (например, “плато” стабильных значений в начале решения психофизической задачи), можно делать вывод о том, что испытуемый справляется с задачей и дает ответы неслучайным образом. Если же его значения показателя d' находятся ниже этой границы, но по ходу эксперимента преодолевают указанный порог, можно сделать вывод о том, что произошло научение и испытуемый перешел от стохастических ответов к неслучайным. Примеры см. на рис. 5, а.

Для решения задачи о том, произошло ли существенное увеличение или уменьшение показателя d' (произвольное или связанное с теми или иными экспериментальными факторами), модель конструируется аналогичным образом, однако в качестве математического ожидания подставляется не ноль, а эмпирическое значение того диапазона, с которым предполагается проводить сравнение (например, рассчитанное по “плато” стабильных значений, см. предыдущий пункт).

В качестве примера можно привести задачу оценки совершенствования навыка. В том случае, если испытуемый решает задачу на неслучайном уровне, однако во время прохождения экспериментальной процедуры его показатель d' выходит



Рис. 5. Пример участников исследования, которые преодолели точку “неслучайного” решения (а) или улучшили результат относительно начального диапазона показателей d' (б)

Примечание. Горизонтальной линией обозначено “пороговое” значение, превышение которого говорит о достоверном отличии от нуля (а) или начальных значений d' (б).

за пределы диапазона модели нормального распределения с математическим ожиданием, равным значениям, соответствующим стартовому “плато” при решении психофизической задачи, можно говорить о совершенствовании (улучшении) навыка решения задачи. Примеры см. на рис. 5, б.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, был разработан математико-методический инструментарий, позволяющий расширять как область применения психофизической методики “Да/Нет”, так и рассчитываемый при ее использовании показатель d' для изучения динамических характеристик. Несмотря на то что динамика показателя d' отмечалась в литературе, ее

процессуальная характеристика специально не исследовалась. В данной статье приводится пример применения разработанного математико-методического инструментария в рамках исследования процессов научения: приобретения и совершенствования навыка. Разработанный инструментарий позволит проводить сравнение и частное изучение не только данных процессов, но и многих других, в том числе перенос навыка, его восстановление, исследование феноменов внимания, исследование динамики психофизических показателей в условиях изменяющихся состояний индивида и многие другие. Также в заключение стоит отметить, что разработанный инструментарий позволяет работать не только с традиционным показателем d' , используемым при работе с методикой “Да/Нет”, но с небольшими корректировками он

может быть перенесен и на другие показатели, включающие эту методику, например на критерий принятия решения β .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Александров И.О.* Формирование структуры индивидуального знания. М.: Институт психологии РАН, 2006.
2. *Бардин К.В.* Проблема порогов чувствительности и психофизические методы. М.: Наука, 1976.
3. *Бардин К.В., Индлин Ю.А.* Начала субъектной психофизики: В 2 т. М.: Институт психологии РАН, 1993.
4. *Бардин К.В., Скотникова И.Г.* Исследование зависимости динамики и успешности решения человеком психофизических задач от проявлений его собственной активности как субъекта сенсорных измерений // Вестник Российского гуманитарного научного фонда. 1996. № 4. С. 176–182.
5. *Брушлинский А.В.* Проблемы психологии субъекта. М.: Институт психологии РАН, 1994. 109 с.
6. *Войтенко Т.П., Бардин К.В.* Влияние когнитивных особенностей на эффективность различения акустических сигналов // Когнитивные стили. Тезисы научно-практического семинара / Под ред. В.А. Колги. Таллин: Изд-во Таллиннского пед. ин-та, 1986. С. 68–72.
7. *Войтенко Т.П.* Сенсорная тренировка как фактор развития чувствительности: Дис. ... канд. психол. наук. М., 1989.
8. *Гладилин Д.Л., Арамян Э.А., Юдаков К.С., Апанович В.В.* Динамика изменения амплитуд компонентов ЭЭГ в процессе научения // Психология — наука будущего: Материалы X Международной конференции молодых ученых “Психология — наука будущего”, 16–17 ноября 2023, г. Москва / Отв. ред. А.Л. Журавлев, Е.А. Сергиенко, Н.Е. Харламенкова. М.: Институт психологии РАН, 2023. С. 114–117.
9. *Гусев А.Н., Измайлов Ч.А., Михалевская М.Б.* Изменение в психологии: общий психологический практикум. 2-е изд. М.: Смысл, 1998.
10. *Забродин Ю.М., Пахомов А.П., Шаповалов В.И.* Взаимосвязь показателей эффективности обнаружения сигнала // Психофизика сенсорных и сенсомоторных процессов / отв. ред. Ю.М. Забродин. М.: Наука, 1984. С. 7–39.
11. *Запорожец А.В., Венгер Л.А., Зинченко В.П., Рузская А.Г.* Восприятие и действие. М.: Просвещение, 1967.
12. *Лови О.В., Дубровский В.Е.* Исследование стратегии принятия решений “наивным испытуемым” в пороговых задачах с точки зрения ее соответствия “модели идеального наблюдателя” // Психология сегодня. Ежегодник РПО. 1996. Т. 2. № 3. С. 7–9.
13. *Пахомов А.П.* Динамичность показателей обнаружения сигналов в психофизических исследованиях // Проблемы инженерной психологии. М.: Наука, 1979. С. 73–74.
14. *Скотникова И.Г.* Проблемы субъектной психофизики. М.: Институт психологии РАН, 2008.
15. *Скотникова И.Г.* Психология сенсорных процессов. Психофизика // Психология XXI века: Учебник для вузов. Гл. 3.1 / Под ред. В.Н. Дружинина. М.: ПЕР СЭ, 2003. С. 117–168.
16. *Скотникова И.Г. и др.* Соотношение уверенности в решении с его правильностью, латентностью и характеристиками сенсорной задачи // Экспериментальный метод в структуре психологического знания. Сер. “Интеграция академической и университетской психологии” / Отв. ред. В.А. Барабанщиков. М.: Институт психологии РАН; МГППУ, 2012. С. 123–128.
17. *Фер Р.М., Бакарак В.Р.* Психометрика: Введение / пер. с англ. А.С. Наumenко, А.Ю. Попова; под ред. Н.А. Батурина, Е.В. Эйдмана. Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2010.
18. *Шапкин С.А., Дикая Л.Г.* Деятельность в особых условиях: компонентный анализ структуры и стратегии адаптации // Психологический журнал. 1996. Т. 17. № 1. С. 19–34.
19. *Юдаков К.С., Апанович В.В., Арамян Э.А., Гладилин Д.Л., Александров Ю.И.* Отражение формирования навыка различения коротких интервалов времени в параметрах ССП // Психологический журнал. 2023. Т. 44. № 6. С. 48–60.
20. *Gibbons H.* Event-related brain potentials of temporal generalization: the P300 span marks the transition between time perception and time estimation // Behavioral Neuroscience. 2022. V. 136. № 5. P. 430–444.
21. *Green D.M., Swets J.* A Signal Detection Theory and Psychophysics. N.Y.: Wiley, 1966.
22. *Tanner W., Swets J.* A Decision-making Theory of Visual Detection // Psychological review. 1954. V. 61. № 6. P. 401.

DEVELOPMENT OF THE PRINCIPLE OF ANALYZING THE DYNAMICS OF THE PSYCHOPHYSICAL INDICATOR d' USING THE “MOVING AVERAGE” METHOD⁴

V. V. Apanovich^{1,2,3,*}, K. S. Yudakov^{1,2,**}, P. I. Egorova^{1,***}

¹State Academic University for Humanities;
119049, Moscow, Maronovsky lane, 26.

²Institute of Psychology, Russian Academy of Sciences;
129366, Moscow, Yaroslavskaya str., 13, bldg. 1, Russia.

³National Research University Higher School of Economics;
101000, Moscow, Myasnitskaya str., 10, Russia.

*Ph.D. (Psychology), Associate Professor of the Faculty, Researcher at the Lab. V.B. Shvyrkov Psychophysiology,
Junior Researcher at the International Lab. Social Neuroscience.

E-mail: apanovitschvv@yandex.ru

**Graduate Student of the Faculty of Psychology, Junior Researcher at the Lab. Psychophysiology
Named after V.B. Shvyrkov.

E-mail: kost05062000@mail.ru

***Graduate student of the Faculty of Psychology.

E-mail: polina.egorova2102@gmail.com

Received 29.05.2024

Abstract. The article describes the possibilities of using the “moving average” method in the analysis of psychophysical indicators using the example of indicator d' used in the “Yes” method/No”, based on the Theory of signal detection. The general principles of applying the “sliding window” method to the psychophysical indicator d' are considered, as well as the features of its use. Methods are described to test the basic assumptions inherent in the model of the Theory of signal detection, but in relation to dynamic data. Some possible tasks are analyzed, the solution of which becomes available when using this method of data analysis.

Keywords: “moving average” method, time series analysis, psychophysics, signal detection theory, “Yes” method/No”, indicator d' .

REFERENCES

1. Aleksandrov I.O. Formirovanie struktury individual'nogo znanija. Moscow: Institut psihologii RAN, 2006. (In Russian)
2. Bardin K.V. Problema porogov chuvstvitel'nosti i psihofizicheskie metody. Moscow: Nauka, 1976. (In Russian)
3. Bardin K.V., Indlin Ju.A. Nachala sub'ektnoj psihofiziki. V 2 v. Moscow: Institut psihologii RAN, 1993. (In Russian)
4. Bardin K.V., Skotnikova I.G. Issledovanie zavisimosti dinamiki i uspešnosti reshenija chelovekom psihofizicheskikh zadach ot projavlenij ego sobstvennoj aktivnosti kak sub'ekta sensornyh izmerenij. Vestnik Rossijskogo gumanitarnogo nauchnogo fonda. 1996. № 4. P. 176–182. (In Russian)
5. Brushlinskij A.V. Problemy psihologii sub'ekta. Moscow: Institut psihologii RAN, 1994. 109 p. (In Russian)
6. Vojtenko T.P., Bardin K.V. Vlijanie kognitivnyh osobenostej na jeffektivnost' razlichenija akusticheskikh signalov. Kognitivnye stili. Tezisy nauchno-prakticheskogo seminar. Ed. V.A. Kolgi. Tallin: Izd-vo Tallinnskogo ped. in-ta, 1986. P. 68–72. (In Russian)
7. Vojtenko T.P. Sensornaja trenirovka kak faktor razvitija chuvstvitel'nosti: Dis. ... kand. psihol. nauk. Moscow, 1989. (In Russian)
8. Gladilin D.L., Aramjan Je.A., Judakov K.S., Apanovich V.V. Dinamika izmenenija amplitud komponentov EEG v processe nauchenija. Psihologija — nauka budushhego: Materialy X Mezhdunarodnoj konferencii molodyh uchenykh “Psihologija — nauka budushhego”, 16–17 november 2023, Moscow. Eds. A.L. Zhuravlev, E.A. Sergienko, N.E. Harlamenkova. Moscow: Institut psihologii RAN, 2023. P. 114–117. (In Russian)
9. Gusev A.N., Izmajlov Ch.A., Mihalevskaja M.B. Izmerenie v psihologii: obshhij psihologicheskij praktikum. 2-e izd. Moscow: Smysl, 1998. (In Russian)
10. Zabrodin Ju.M., Pahomov A.P., Shapovalov V.I. Vzaimosvjaz' pokazatelej jeffektivnosti obnaruzhenija signala. Psihofizika sensornyh i sensomotornyh processov.

⁴ The research was supported by the Russian Science Foundation grant № 23-18-00473 (Institute of Psychology of the Russian Academy of Sciences).

- Ed. Ju.M. Zabrodin. Moscow: Nauka, 1984. P. 7–39. (In Russian)
11. *Zaporozhec A.V., Venger L.A., Zinchenko V.P., Ruzskaja A.G.* Vosprijatie i dejstvie. Moscow: Prosveshhenie, 1967. (In Russian)
 12. *Lovi O.V., Dubrovskij V.E.* Issledovanie strategii prinjatiya reshenij “naivnym ispytuemym” v porogovyh zadachah s točki zrenija ee sootvetstvija “modeli ideal’nogo nabljudatelja”. Psihologija segodnja. Ezhegodnik RPO. 1996. V. 2. № 3. P. 7–9. (In Russian)
 13. *Pahomov A.P.* Dinamichnost’ pokazatelej obnaruzhenija signalov v psihofizicheskikh issledovanijah. Problemy inzhenernoj psihologii. Moscow: Nauka, 1979. P. 73–74. (In Russian)
 14. *Skotnikova I.G.* Problemy sub’ektnoj psihofiziki. Moscow: Institut psihologii RAN, 2008. (In Russian)
 15. *Skotnikova I.G.* Psihologija sensoryh processov. Psihofizika. Psihologija XXI veka: Uchebnik dlja vuzov. Ch. 3.1. Ed. V.N. Druzhinina. Moscow: PER SJe, 2003. P. 117–168. (In Russian)
 16. *Skotnikova I.G. i dr.* Sootnoshenie uverenosti v reshenii s ego pravil’nost’ju, latentnost’ju i harakteristikami sensornoj zadachi // Jeksperimental’nyj metod v strukture psihologicheskogo znanija. Ser. “Integracija akademicheskoi i universitetskoi psihologii”. Otvetstvennyj redaktor V.A. Barabanshnikov. Moscow: Institut psihologii RAN; MGPPU, 2012. P. 123–128. (In Russian)
 17. *Fer R.M., Bakarak V.R.* Psihometrika: Vvedenie. trans from eng. A.S. Naumenko, A.Ju. Popova; Eds. N.A. Baturina, E.V. Jejdmana. Cheljabinsk: Izdatel’skij centr JuUrGU, 2010. (In Russian)
 18. *Shapkin S.A., Dikaja L.G.* Dejatel’nost’ v osobyh uslovijah: komponentnyj analiz struktury i strategii adaptacii. Psikhologicheskii zhurnal. 1996. V. 17. № 1. P. 19–34. (In Russian)
 19. *Judakov K.S., Apanovich V.V., Aramjan Je.A., Gladilin D.L., Aleksandrov Ju.I.* Otrazhenie formirovanija navyka razlichenija korotkih intervalov vremeni v parametrah SSP. Psikhologicheskii zhurnal. 2023. V. 44. № 6. P. 48–60. (In Russian)
 20. *Gibbons H.* Event-related brain potentials of temporal generalization: the P300 span marks the transition between time perception and time estimation. Behavioral Neuroscience. 2022. V. 136. № 5. P. 430–444.
 21. *Green D.M., Swets J.* A Signal Detection Theory and Psychophysics. New York: Wiley, 1966.
 22. *Tanner W., Swets J.* A Decision-making Theory of Visual Detection. Psychological review. 1954. V. 61. № 6. P. 401.