



ПСИХОФИЗИОЛОГИЯ | PSYCHOPHYSIOLOGY

Научная статья | Original paper

Характер зависимости латентного периода тактильно-моторной реакции от интенсивности и длительности тактильного стимула

В.И. Соболев¹ ✉, В.В. Труш², М.Н. Попов¹

¹ Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, Ялта, Российская Федерация

² Донецкий государственный университет, Донецк, Российская Федерация

✉ v.sobolev@mail.ru

Резюме

Контекст и актуальность. Природа осознанного ощущения и механизмы его формирования являются одной из фундаментальных проблем психологии и психофизиологии восприятия. **Цель:** в психофизиологическом эксперименте выявить характер зависимости латентного периода тактильно-моторной реакции от интенсивности и длительности тактильного стимула, а также измерить основные параметры тактильно-моторной реакции — тактильного порога с соответствующим ему значением латентного периода реакции. **Гипотеза.** Характер зависимости латентного периода тактильно-моторной реакции от интенсивности тактильного давления описывается логарифмическим уравнением и согласуется с основным психофизическим законом Вебера-Фехнера. **Методы и материалы.** Тактильный стимул (актуатор с волосками Фрея) наносили в область подушечки первой фаланги мизинца правой руки, после чего измерялись основные параметры тактильно-моторной реакции (ТМР) в ответ на тактильные стимулы разной интенсивности и длительности. **Результаты.** Установлено, что латентный период ТМР в рамках исследованного диапазона длительности стимула (20 мс и 40 мс) при скорости его нарастания 0,122 Н·с не зависит от его продолжительности и определяется лишь величиной тактильного давления. Пороговое ощущение (подушечка первой фаланги мизинца) проявляется при тактильном давлении 525 кПа при скорости тактильной стимуляции 0,122 Н·с и характеризуется латентным периодом ТМР 291—312 мс. **Выводы.** Характер зависимости латентного периода ТМР от интенсивности тактильного стимула (тактильного давления) описывается логарифмическим уравнением при высоком значении коэффициента детерминации ($R^2 = 0,98 \div 0,99$) и в рамках исследованного диапазона «стимул — реакция» согласуется с основным психофизическим законом Вебера-Фехнера.

Ключевые слова: тактильное ощущение, латентный период реакции, характер зависимости латентного периода от величины тактильного давления

Для цитирования: Соболев, В.И., Труш, В.В., Попов, М.Н. (2026). Характер зависимости латентного периода тактильно-моторной реакции от интенсивности и длительности тактильного стимула. *Экспериментальная психология*, 19(1), 42–57. <https://doi.org/10.17759/exppsy.2026190103>





The nature of the dependence of the latent period of the tactile-motor response on the intensity and duration of the tactile stimulus

V.I. Sobolev¹ ✉, V.V. Trush², M.N. Popov¹

¹ V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Yalta, Russian Federation

² Donetsk State University, Donetsk, Russian Federation

✉ v.sobolev@mail.ru

Abstract

Context and relevance. The nature of conscious sensation and the mechanisms of its formation are one of the fundamental problems of psychology and psychophysiology of perception. **Objective:** to reveal the nature of the dependence of the latency period of the tactile-motor reaction on the intensity and duration of the tactile stimulus in a psychophysiological experiment, as well as to measure the main parameters of the tactile-motor reaction — the tactile threshold with the corresponding value of the latency period of the reaction. **Hypothesis.** The nature of the dependence of the latency period of the tactile-motor reaction on the intensity of tactile pressure is described by a logarithmic equation and is consistent with the basic psychophysical law of Weber-Fechner. **Methods and materials.** A tactile stimulus (actuator with Frey hairs) was applied to the area of the pad of the first phalanx of the little finger of the right hand, after which the main parameters of the tactile-motor response (TMR) were measured in response to tactile stimuli of varying intensity and duration. **Results.** It was found that the latency period of the TMR within the studied range of stimulus duration (20 ms and 40 ms) at a rate of increase of 0.122 N·s does not depend on its duration and is determined only by the magnitude of tactile pressure. The threshold sensation (pad of the first phalanx of the little finger) manifests itself at a tactile pressure of 525 kPa at a tactile stimulation rate of 0.122 N·s and is characterized by a TMR latency period of 291—312 ms. **Conclusions.** The nature of the dependence of the TMR latency period on the intensity of the tactile stimulus (tactile pressure) is described by a logarithmic equation with a high coefficient of determination ($R^2 = 0.98 \div 0.99$) and, within the studied “stimulus-response” range, is consistent with Weber-Fechner basic psychophysical law.

Keywords: tactile sensation, reaction latency period, nature of the dependence of the latency period on the magnitude of tactile pressure

For citation: Sobolev, V.I., Trush, V.V., Popov, M.N. (2026). The nature of the dependence of the latent period of the tactile-motor reaction on the intensity and duration of the tactile stimulus. *Experimental Psychology (Russia)*, 19(1), 42—57. (In Russ.). <https://doi.org/10.17759/exppsy.2026190103>

Введение

В психологии восприятия по-прежнему остаются актуальными исследования природы осознанного ощущения и механизмов его формирования (Барабанщиков, 2009). В литературе можно найти большое число публикаций, посвященных изучению психофизиологических механизмов функционирования сенсорных систем, наиболее изученными из которых являются зрительная и слуховая (Шмидт, 1984; Соболев, 2020; Соболев, Попов, 2022; Камкин, Каменский, 2004). Не остаются в стороне от внимания исследователей и другие типы анализаторов, в том числе тактильный. Современные представления о разных аспектах механорецепции приведены в обзорах и руководствах по физиологии (Забродин, Лебедев, 1977; Шмидт, 1984; Ильинский, 1975; Камкин, Каменский, 2004; Abraira, Ginty, 2013; Handler, Ginty, 2021 et al.).



Существует несколько принципиально важных аспектов в исследовании психофизиологических особенностей функционирования тактильного анализатора, среди которых не последнее место принадлежит изучению его сенсомоторных характеристик: порога тактильно-моторной реакции (ТМР), ее латентного периода (ЛП), а также выяснению характера зависимости «интенсивность тактильного стимула — ЛП».

Для определения абсолютного тактильного порога (ТП) наиболее часто используют степень прогиба кожи при ее стимуляции. По данным ряда авторов (Choi et al., 2020; Lindblom, Lindström, 1976; Rollman, 1973) тактильное ощущение возникало при смещении кожи под влиянием стимула в диапазоне 3—69 мкМ. В исследованиях, проведенных на приматах, установлено, что значение тактильного порога в голой коже, выраженного в единицах амплитуды ее прогиба, колебалось еще в более значительных пределах (Darlington, Donaldson, 1973; Lindblom, 1965; Rollman, 1973).

С целью измерения порога тактильной реакции могут быть использованы и нейрофизиологические подходы (Ильинский, 1975). В работе Jochanson, Vallbo (1979b) показано, что тактильный зонд при углублении в кожу на 60 мкМ со скоростью 4 мм/с вызывал генерацию быстро адаптирующимися рецепторами 1–2 электрических импульсов, которых, по мнению авторов, несмотря на их ограниченное число, было достаточно для формирования тактильного ощущения. Однако параметры развиваемой силы либо тактильного давления не приводятся. Несколько другие результаты были получены в работе Knibestöl (1973). Автором при регистрации импульсов от локтевого и срединного нервов в ответ на механические стимулы было установлено, что для быстро адаптирующихся рецепторов пороги амплитуды варьировались от 0,05 до 1,65 мм, а пороги скорости колебались в диапазоне от 0,4 до 39,3 мм/сек.

Величина порога может быть выражена и в абсолютных единицах развиваемой при тактильной стимуляции силы или оказываемого давления. Так, по данным Choi и коллег (Choi et al., 2020), ТП в единицах давления соответствовал 475 кПа при длительности стимула 2 мс; при стимуляции с частотой 300 Гц он уменьшался до 407 кПа. Пороговый уровень тактильной чувствительности определялся не только в исследованиях тактильных рецепторов человека, но также, например, в экспериментах на карповых рыбах. В одной из своих работ Девигина и Лапшин (2020) показали, что ТП в наружных покровах головы составлял 0,05—0,2 г/мм². Использование в научных и практических целях нитей фон Фрея в ручном режиме позволяет проводить поиск тактильных точек и областей, а также гарантированно калибровать лишь силу тактильного раздражения, но не его длительность.

По-видимому, большое различие пороговых значений и разнообразие использованных единиц измерения, полученных в психофизиологических, а также нейрофизиологических исследованиях, в значительной степени определяется рядом переменных факторов: типом тактильных рецепторов, их локализацией и целым комплексом параметров тактильного стимула (силой, площадью стимуляции, длительностью тактильного стимула, скоростью его нарастания и др.).

Таким образом, в настоящее время имеются достаточно убедительные результаты, касающиеся измерения психофизического и электрофизиологического порога тактильного ответа. Однако количественная оценка психомоторного компонента — порога тактильно-моторной реакции, выраженного в единицах силы и механического давления, практически не проводилась. Его определение явилось первой задачей настоящей работы.

Второй показатель тактильно-моторной реакции касается ее латентного периода. Проблема его измерения осложняется необходимостью стандартизации и достаточно высокими техниче-



скими требованиями к тактильному стимулятору, в частности возможностью дозирования силы и длительности стимула. По данным немногочисленной литературы, считается, что у человека ЛП ТМР колеблется в пределах 150—500 мс (Бойко, 1964; Kim et al., 2014). Однако указанные данные получены в основном в экспериментах с так называемым тактильным касанием разных участков кожи человека с неизвестной силой и длительностью, что ограничивает их ценность. В связи с этим вторая задача настоящей работы связана с измерением латентного периода тактильно-моторной реакции, соотнесенного со скоростью нанесения тактильного стимула и его интенсивностью, выраженной в абсолютных величинах (тактильное давление, *кПа*).

Важное место в психологии восприятия отводится вопросу о характере связи между интенсивностью сенсорного стимула и степенью выраженности ощущения (Забродин, Лебедев, 1977; Романчак, 2022; Ильинский, 1975; Маскау, 1963). Такого рода зависимость, как известно, описывается либо классическим логарифмическим законом Вебера-Фехнера (Fechner, 1966), либо степенным законом Stevens (1957). При построении эмпирической кривой «интенсивность стимула — эффект» выраженность психической реакции чаще всего оценивают на основании принципа «Да — нет», т. е. «ощущаю» или «не ощущаю». В одной из своих многочисленных работ Knibestöl (1973), изучая зависимость между степенью прогиба кожи под влиянием тактильного стимулятора и возникновением ощущения (принцип «Да — нет»), пришел к выводу, что искомая зависимость описывается логарифмической функцией.

Следует отметить, что достоверные сведения о характере такой зависимости в отношении латентного периода тактильно-моторной реакции в литературе не встречаются, хотя выяснению ее типа в отношении других психометрических показателей, например зрительно- и аудиомоторной реакций, посвящено достаточно большое число исследований (Забродин, Лебедев, 1977; Соболев, 2020; Соболев, Попов, 2022 и др.). С нашей точки зрения, в психофизических исследованиях сенсомоторных реакций при построении кривой «интенсивность тактильного стимула — реакция» в качестве предпочтительной интегральной единицы интенсивности тактильного стимула следует выбирать *кПа* (Паскаль, килопаскаль, развиваемое механическое давление); о выраженности ощущения можно судить по значению латентного периода (мс). Экспериментальному анализу такого рода зависимости посвящена третья задача нашего исследования.

Целью данного исследования является в психофизиологическом эксперименте с участием испытуемых выявление характера зависимости латентного периода тактильно-моторной реакции от интенсивности и длительности тактильного стимула, а также измерение основных параметров тактильно-моторной реакции — тактильного порога с соответствующим ему значением латентного периода реакции.

Методы и материалы

Объект и процедура исследования. В исследованиях приняли участие 10 студентов-добровольцев (девушки) Гуманитарно-педагогической академии (филиал) ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского» в г. Ялте возрастом $21 \pm 0,1$ года.

В ходе эксперимента кисть правой руки испытуемого размещалась на платформе ладонью вверх, а три пальца этой же кисти (средний, безымянный и мизинец) надежно фиксировали с помощью двухсторонней клейкой ленты. Указательный палец оставался свободным и служил для выполнения операции «СТОП». Тактильный стимул наносили в область подушечки первой фаланги мизинца в район наибольшего сосредоточения тактильных ре-



цепторов (Johansson, Vallbo, 1979a; Johansson, Vallbo, 1979b; Соболев, Попов, 2022; Lindblom, Lindström, 1976), в том числе быстро реагирующих (Knibestöl, 1973). Далее дистальный конец тактильного волоска под оптическим контролем с помощью шагового двигателя подвигали возможно ближе к поверхности кожи, но без ее касания, после чего сразу же производилась тактильная стимуляция. При возникновении тактильного ощущения испытуемый максимально быстро сгибал указательный палец, отрывая его таким способом от медного контакта и разрывая тем самым электрическую цепь (аналог кнопки «СТОП»), что сопровождалось появлением второй отметки на электронной записи USB-самописца (ADCLab S-Recorder-L, Россия). Первая отметка указывала на длительность тактильного контакта (рис. 1). Латентный период тактильной реакции (время от начала стимула до реакции «СТОП») вычислялся либо курсором на электронной записи самописца, либо в программе Excel после преобразования пакетов *alf*-файлов (рис. 1, Б).

Ход опыта. После подготовительных процедур на участок кожи пальца наносили тактильные стимулы с помощью тактильного волоска № 1 длительностью 20 мс (10 попыток тренировки и сразу за этим — 15 попыток опыт), а затем продолжительностью 40 мс (10 попыток тренировки и 15 попыток опыт). В дальнейшем процедура повторялась, но уже с тактильными волосками № 2, № 3 и № 4. Число замеров (в наших условиях при длительности стимуляции 20 и 40 мс) мы намеренно не увеличивали, исходя из вероятности развития признаков тренировки и последующего утомления, поскольку, согласно использованному алгоритму опыта, общее число проб за весь период одномоментного исследования составило 200.

Выбор относительно узкого диапазона значений длительности тактильных стимулов (20 и 40 мс) определялся также ранее проведенными нами исследованиями (Соболев, Попов, Труш, 2024), в которых (без определения их силы или развиваемого давления) было установлено, что латентный период тактильно-моторной реакции не менялся в широком диапазоне длительности тактильных стимулов — от 10 до 100 мс.

Оборудование. Для решения поставленных в работе задач была разработана экспериментальная установка на базе электромеханического линейного актуатора (малогабаритный электрический соленоид типа КК-0530В). К подвижному стержню соленоида поочередно крепились съемные инъекционные иглы (G28 и G30) с закрепленными в их полости калиброванными упругими синтетическими волосками (монофиламентами) разного диаметра и разной длины. С целью улучшения стабильности хода (уменьшение горизонтального люфта) инъекционная игла помещалась внутрь продолговатого металлического цилиндра подходящего диаметра. Для вертикального перемещения тактильного волоска в нужную исходную позицию (возможно ближе к коже пальца) использовался шаговый двигатель Nemo-17 (42HS3404A4, SUMTOR), выполнявший в данном случае роль микровинта. Управление шаговым двигателем осуществлялось путем подачи через драйвер A4988 серии прямоугольных импульсов от DDS-генератора.

Тактильный стимул создавался при движении сердечника соленоида с тактильным волоском, включенного в схему электронного ключа, под воздействием прямоугольного импульса нужной длительности (DDS-генератор сигналов FY6900). Свободный рабочий ход сердечника для каждого тактильного волоска механическим способом устанавливался на заданную условиями опыта длину (4 и 8 мм) и зависел от длины тактильной нити, определяемой, в свою очередь, требуемой силой тактильного стимула. В любом случае расстояние рабочего хода устанавливалось исходя из требований к степени изгиба тактильного волоска при соприкосновении



его с поверхностью кожи. При таком условии все использованные волоски при нанесении тактильного стимула изгибались на 30—40%, обеспечивая постоянную силу тактильного стимула.

Использованный тип линейного соленоида в заводском исполнении не позволял наносить тактильный стимул длительностью меньше 30 мс при заданном свободном ходе сердечника, что связано преимущественно с длительностью фазы обратного хода его сердечника. В связи с этим для ускорения обратного хода применили дополнительную возвратную стальную пружину с регулируемой длиной и приемлемо увеличили (по сравнению с номинальным) ток срабатывания актуатора. Все это позволило без изменения выбранной величины регулируемого свободного рабочего хода сердечника, а значит и степени перемещения тактильного волоска, снизить минимальное время тактильного контакта соленоида с кожей в рабочем цикле и установить его на уровне 20 мс. Длительность электрического импульса генератора, управляющего электронным ключом, в этом случае определялась экспериментально и составила в нашем случае 23 мс (3 мс занимало время задержки момента начала срабатывания соленоида). При необходимости увеличения времени тактильного контакта (в наших опытах до 40 мс) необходимо было лишь удлинить электрический импульс управления электронным ключом до 43 мс, что не вызывало никаких затруднений.

Поскольку работа актуатора сопровождается некоторым звуковым эффектом и вибрацией, были приняты все необходимые меры для их приемлемого ослабления (поролоновые амортизаторы и звукоизоляция соленоида). Дополнительно во время опыта испытуемые использовали звукоизолирующие головные телефоны, подключенные к источнику белого шума (один из каналов DDS-генератора FY6900).

Калибровка тактильных волосков проводилась на экспериментальной установке путем подачи на соленоид прямоугольного электрического импульса длительностью 3 с, которая была достаточной для осуществления процесса надежного измерения электронными весами силы, развиваемой тактильными волосками. Использовались цифровые электронные весы ТЛ-серии СХ-128 (Китай, точность измерения равна 1 мг). Силу, развиваемую тактильными волосками, округляли до 10 мг.

С целью возможно большей стандартизации условий опытов использовались доступные нам тактильные нити двух диаметров: 0,11 мм и 0,06 мм. Первые были предназначены для подготовки тактильных волосков, развивающих высокую силу (следовательно, и давление), а вторые — слабую, но превышающую пороговую. Поскольку исходный диаметр синтетических нитей различался, то в процессе предварительной калибровки каждый тактильный волосок перед очередным циклом срабатывания соленоида последовательно укорачивали до тех пор, пока развиваемая им сила не достигала заданной экспериментатором величины. Таким способом удалось подготовить из двух синтетических нитей четыре разных тактильных волоска с параметрами развиваемой силы 150 мг (волосок № 1), 650 мг (волосок № 2), 3010 мг (№ 3) и 4400 мг (№ 4).

Выбор значений параметров тактильной стимуляции был обусловлен необходимостью использования широкого диапазона развиваемой тактильной силы — от пороговой до сверхпороговой, но не достигающей болевого уровня.

Для корректной интерпретации полученных данных интенсивность тактильной стимуляции должна выражаться не в силе тактильного стимула (например, грамм силы, *g сила*), а в величинах, отнесенных к площади ее приложения, например к 1 см² или 1 мм². В подобном случае базовой единицей является Паскаль (мера механического давления). С учетом



этого требования, основываясь на диаметре тактильных нитей, их длине и развиваемой с их помощью силы, использованные в нашей работе волоски фон Фрея при тактильной стимуляции обеспечивали следующее давление: волосок № 1 — 525 кПа, волосок № 2 — 2276 кПа, волосок № 3 — 3107 кПа и волосок № 4 — 4542 кПа. Дробные значения обусловлены разным диаметром волосков и коэффициентами пересчета в соответствующих формулах.

В подготовительном периоде настройки параметров тактильного стимулятора с помощью цифрового осциллографа и дополнительных приспособлений была вычислена скорость нанесения тактильного раздражения (0,32—0,33 м/с), которая для всех волосков фон Фрея была одинаковой, так как определялась только условиями работы актуатора.

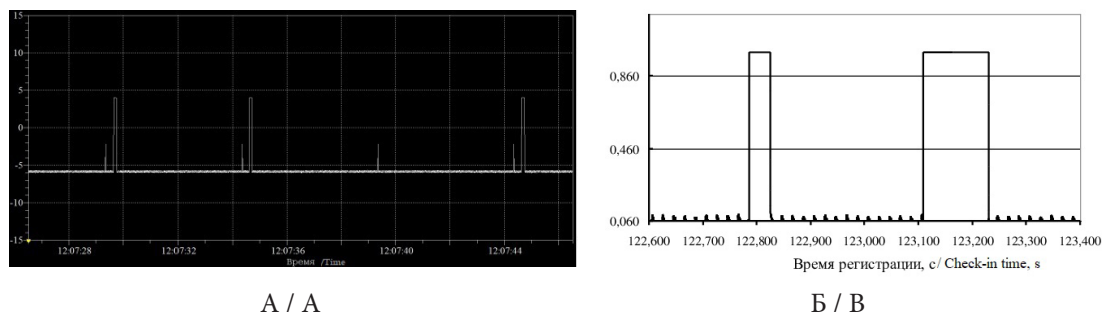


Рис. 1. Образец оригинальной электронной записи регистрации латентного периода тактильно-моторной реакции (А) и его измерение в программе Excel (Б)

Примечание: на А показана оригинальная электронная запись четырех тактильно-моторных реакций при стимуляции тактильными стимулами пороговой величины (тактильный волосок 150 мг); видно, что на третий стимул реакция отсутствовала, так как испытуемый не смог его идентифицировать; начало первой отметки соответствует моменту нанесения тактильного стимула, а начало второй отметки — моменту начала моторной реакции (форма электрического импульса аппаратным способом была нормализована); на Б представлен образец вычисления латентного периода (323 мс) в программе Excel после преобразования оригинального alf-файла самописца

Fig. 1. Sample of the original electronic recording of the latency period of the tactile-motor reaction (A) and its measurement in Excel (B)

Note: A shows the original electronic recording of four tactile-motor responses to tactile stimuli of threshold intensity (tactile hair 150 mg); it can be seen that there was no reaction to the third stimulus, as the subject was unable to identify it; the beginning of the first mark corresponds to the moment of application of the tactile stimulus, and the beginning of the second mark corresponds to the moment of the onset of the motor reaction (the shape of the electrical impulse was normalized by hardware means); B shows an example of calculating the latency period (323 ms) in Excel after converting the original alf-file from the recorder

Статистический анализ. В процессе статистической обработки полученных данных рассчитывали (пакет анализа Excel и SPSS Statistica-17) среднюю величину латентного периода тактильно-моторной реакции (мс), ряд параметров вариальности (ошибка средней арифметической величины, стандартное отклонение, дисперсию выборки, коэффициент вариации), а также тестировали вариационные ряды на предмет нормального распределения данных (тест Шапиро-Уилка). Все анализируемые ряды подчинялись закону нормального распределения. Для описания характера зависимости между величиной развиваемого тактильными волосками давления и латентным периодом реакции использовался регрессионный и корреляционный анализ. Оценка статистической значимости между теми или иными сравниваемыми показателями проводилась с помощью двухвыборочного t-теста для иско-



мых выборок с различными дисперсиями, а также двухвыборочного F-теста для дисперсии при условии $p < 0,05$.

Результаты

Первой задачей в настоящей работе явилось выявление характера зависимости латентного периода тактильно-моторной реакции (ЛП ТМР) от длительности тактильного стимула. С этой целью ЛП ТМР измерялся при стимуляции тактильными стимулами длительностью 20 и 40 мс. Выяснилось, что в рамках существующего алгоритма исследования латентный период тактильно-моторной реакции от длительности нанесения тактильного стимула не зависел. Например, как видно из таблицы, при использовании тактильного волоска № 1 (525 кПа) латентный период реакции при длительности стимула 20 мс составил $302 \pm 6,7$ мс, а при длительности 40 мс, соответственно, $291 \pm 8,8$ мс. Различия были статистически незначимы ($p > 0,05$).

Таблица / Table

Зависимость латентного периода тактильно-моторной реакции от величины тактильного давления и его длительности
The dependence of the latency period of the tactile-motor response on the magnitude of tactile pressure and its duration

Характеристика тактильного стимула / Characteristics of tactile stimulus		Статистические параметры / Statistical parameters			
Тактильный волосок / Tactile hair	Длительность стимула / Stimulus duration	Среднее и стандартная ошибка / Average and standard error	Дисперсия выборки и стандартное отклонение / Sample variance and standard deviation	Коэффициент вариации / Coefficient of variation	Количество испытуемых / Number of subjects
№ 1 (525 кПа) / No 1 (525 kPa)	20 мс / 20 ms	$302 \pm 6,7$	451 (21)	7,0 %	10
	40 мс / 40 ms	$291 \pm 8,8$	780 (28)	9,6 %	10
№ 2 (2276 кПа) / No 2 (2276 kPa)	20 мс / 20 ms	$262 \pm 3,7$	141 (12)	4,6 %	10
	40 мс / 40 ms	$258 \pm 3,4$	115 (11)	4,2 %	10
№ 3 (3107 кПа) / No 3 (3107 kPa)	20 мс / 20 ms	$231 \pm 2,2$	48 (7)	3,0 %	10
	40 мс / 40 ms	$235 \pm 2,0$	38 (6)	2,5 %	10
№ 4 (4542 кПа) / No 4 (4542 kPa)	20 мс / 20 ms	$218 \pm 2,1$	42 (7)	3,2 %	10
	40 мс / 40 ms	$223 \pm 2,1$	45 (7)	3,1 %	10

Примечание: в скобках приведены значения стандартного отклонения.

Note: Standard deviation values are given in parentheses.

При увеличении тактильного давления последовательно до 2276 кПа, 3107 кПа и 4542 кПа такая закономерность сохранялась. Так, при давлении 4542 кПа (волосок № 4) латентный период сенсомоторной реакции при длительности стимула 20 мс составил $218 \pm 2,1$ мс, а при 40 мс соответственно $223 \pm 2,1$ мс, т. е. латентные периоды реакций между собой статистически значимо не различались ($p > 0,05$, табл.) и не зависели от длительности тактильного контакта.

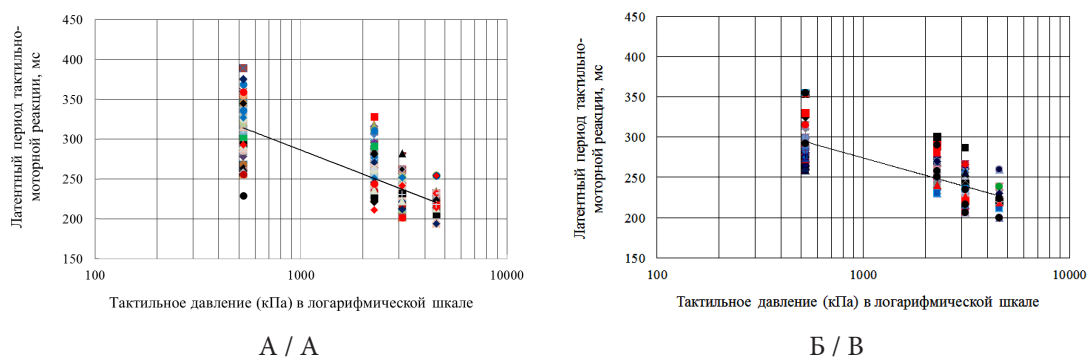


В отличие от стимуляции волоском № 1, в случае использования других тактильных стимулов (2276 кПа, 3107 кПа и 4542 кПа) статистически значимые различия между дисперсиями выборок при длительности стимулов в парах 20 мс и 40 мс во всех приведенных случаях не выявлены. Коэффициенты вариации также практически не различались.

На следующем этапе анализа экспериментальных данных представлял интерес вопрос о характере зависимости между тактильным давлением, с одной стороны, и латентным периодом тактильно-моторной реакции — с другой. С этой целью рассчитывали уравнения регрессии ($n = 10$) с соответствующими значениями коэффициента детерминации (рис. 2). Следует обратить внимание на тот факт, что для графического представления эмпирических вариантов и последующего вычисления указанных статистических параметров использовалась логарифмическая шкала (шкала «X»). Такой выбор был обусловлен тем обстоятельством, что при анализе психофизиологических закономерностей сенсомоторных реакций искомая зависимость между силой стимула и величиной реакции наиболее полно выражается зависимостью логарифмического типа. Как показал анализ, характер зависимости «давление — эффект» (рис. 2, А) при стимуляции тактильными импульсами продолжительностью 20 мс достаточно хорошо описывается классическим логарифмическим уравнением при высоком значении коэффициента детерминации, имеющим следующий вид:

$$y = 441 - 38,4 \text{Ln}(x) \text{ при } R^2 = 0,99, (p < 0,05),$$

где y — значение латентного периода тактильно-моторной реакции, мс; x — давление (кПа), развиваемое тактильным волоском при тактильной стимуляции кожи пальца; R^2 — величина достоверности коэффициента детерминации ($p < 0,05$).



латентный период тактильно-моторной реакции, мс,
тактильное давление (кПа) в логарифмической шкале

Рис. 2. Характер зависимости латентного периода тактильно-моторной реакции (мс) от величины тактильного давления (кПа) при длительности тактильного стимула 20 мс (А) и 40 мс (Б) в шкале логарифмических величин

Примечание: на рисунках представлен весь спектр эмпирических данных (300 точек на каждом рисунке), полученных в эксперименте; линия логарифмического уравнения построена на основании усредненных данных по группам ($n = 10$)

Fig. 2. The nature of the dependence of the latency period of the tactile-motor response (ms) on the magnitude of tactile pressure (kPa) for a tactile stimulus duration of 20 ms (A) and 40 ms (B) on a logarithmic scale

Note: The figures show the entire range of empirical data (300 points in each figure) obtained in the experiment; the logarithmic equation line is constructed based on the averaged data for each group ($n = 10$)



Ровно такая же по характеру зависимость имела место при стимуляции тактильными импульсами длительностью 40 мс (рис. 2, Б):

$$y = 501 - 33,3 \ln(x) \text{ при } R^2 = 0,98, (p < 0,05).$$

Отметим, что в обоих случаях значения вычисленных коэффициентов детерминации были более 0,9; данный факт свидетельствует о высокой степени соответствия рассчитанных трендовых моделей эмпирическим данным.

С целью расширенного анализа данных дополнительно вначале рассчитали для каждого из 10 испытуемых уравнение линейной регрессии (по 4 точкам развиваемого тактильного давления), а затем вычислили средний коэффициент регрессии ($R_{x/y}$) для всей группы и параметры его вариации. Это позволило в дальнейшем сравнить два сводных коэффициента линейной регрессии для вариационного ряда 20 мс и 40 мс (соответственно, $-0,0165 \pm 0,0019$, $p < 0,05$ и $-0,0175 \pm 0,0023$, $p < 0,05$). Статистически значимых различий между ними не выявлено ($p > 0,05$). Вариационные ряды (с вычисленными индивидуальными коэффициентами регрессии, $n = 10$) описывались нормальным законом распределения.

Отдельно было вычислено, как основополагающее в нашей работе, уравнение логарифмической регрессии (отдельно для случая 20 мс и 40 мс, см. выше). Во всех вариантах сравнения статистически значимые различия между рядами (20 и 40 мс) отсутствовали.

С целью более подробного анализа характера зависимости «давление — эффект» были оценены и другие типы зависимостей. Так, на основании коэффициента детерминации было выяснено, что наиболее близкой к логарифмической оказалась степенная зависимость ($R^2 = 0,94$) и полиномиальная ($R^2 = 0,92$).

Представляет интерес сравнительный анализ величины латентного периода тактильно-моторной реакции и скорости нанесения тактильного стимула. В данном случае это легко было сделать, поскольку во всех тактильных пробах скорость нанесения стимула была практически постоянной независимо от разновидности тактильного волоска. Это объясняется неизменностью параметров активации актуатора. Так, для тактильных волосков №№ 1—4 скорость нанесения тактильного стимула колебалась в рамках 0,32—0,33 м/с. Небольшие различия объясняются невозможностью точного исходного расположения тактильного волоска относительно поверхности кожи, и, следовательно, дистанции, на которую они перемещались при стимуляции.

Тем не менее, можно сделать вывод о том, что латентный период тактильно-моторной реакции при неизменной скорости нанесения тактильного раздражения определялся в наших экспериментах лишь свойствами тактильных волосков, в частности, зависел от развиваемого ими давления.

Обсуждение результатов

Приступая к обсуждению результатов исследования, прежде всего необходимо сформулировать два основных вывода. Во-первых, латентный период тактильно-моторной реакции в рамках исследованного диапазона (20 мс и 40 мс) не зависит от длительности тактильного стимула. Этот вывод базируется на сравнительном сопоставлении латентных периодов реакции при стимуляции импульсами 20 мс и 40 мс (табл.), которые статистически значимо не различались при использовании всех типов тактильных волосков. Такой результат согласуется с результатами исследований, описанными нами ранее (Соболев, Попов,



Труш, 2024). В частности, с использованием похожего тактильного стимулятора было выявлено, что латентный период тактильного касания (без определения его силы или развиваемого давления) не зависел от его продолжительности в широком диапазоне значений: 10 мс, 50 мс и 100 мс. В среднем он был равен соответственно 203, 206 и 204 мс. В настоящей работе такой вывод распространяется на результаты, полученные при использовании тактильных стимулов длительностью 20 мс и 40 мс, но, что важно, при развиваемом давлении в диапазоне от пороговой величины (525 кПа) до сверхпороговой 4542 кПа. Следует подчеркнуть, что скорость нанесения тактильного стимула в наших экспериментах была выбрана сверхвысокой (0,32—0,33 м/с), в отличие от значений 4 мм/с или >1,56 мм/с, приведенных в работах других авторов (Choi et al., 2020; Johansson, Vallbo, 1979a). Описанная закономерность независимости латентного периода тактильно-моторной реакции от длительности тактильного стимула принципиально отличается от аналогичных зависимостей при исследовании других сенсомоторных реакций, например зрительно-моторных (Соболев, 2020), которые следуют правилу: чем продолжительнее световой стимул (в определенном диапазоне значений), тем короче время реакции. В приведенном примере длительность светового стимула отражает его силу (интенсивность).

Вызывает интерес интерпретация сделанного вывода. В этой связи следует сказать, что тактильный аппарат кожи человека представлен комплексом тактильных рецепторов разной структуры и функциональной специализации (Шмидт, 1984 и др.). Не вдаваясь в детали этого сложного вопроса, можно выделить две большие группы тактильных рецепторов, основанных на разной скорости их адаптации к раздражению — быстро и медленно адаптирующиеся. При использовании в нашей работе относительно коротких тактильных стимулов (20 мс и 40 мс) невысокой интенсивности можно было ожидать, что тактильное ощущение в первую очередь будет связано с активацией быстро адаптирующихся рецепторов, скорее всего телец Мейснера. Такого рода рецепторы отзываются на тактильную стимуляцию генерацией ограниченного во времени и количестве (вплоть до нескольких единиц в «пачке») потенциалов действия. В таком случае становится понятным факт независимости латентного периода реакции от длительности раздражения: генерация одного спайка потенциалов действия рецептором происходит только в начальной фазе тактильной стимуляции, а второго — только в момент его прекращения; в обоих случаях спайки содержат небольшое количество нервных импульсов и носят кратковременный характер. Подтверждением такой интерпретации могут служить нейрофизиологические исследования с синхронной регистрацией временных параметров тактильного стимула и генерируемого тактильным рецептором спайка потенциалов действия. Так, в одной из работ Johansson, Vallbo (1979a) было показано, что в ответ на тактильное касание пороговой величины в течение первых 8—10 мс регистрируются лишь несколько нервных импульсов. Авторы пришли к принципиально важному заключению: осознанное ощущение тактильного контакта возможно даже в ответ на один потенциал действия, генерирующегося быстро адаптирующимся рецептором.

Отмеченную закономерность наблюдали не только в исследованиях рецепторов кожи человека. Так, Девицина и Лапшин (2020) в экспериментах с неинвазивной регистрацией рецепторных ответов на поверхности кожи головы карповых рыб показали, что при тактильном стимуле длительностью 200 мс электрический фазный ответ *on-off* типа быстро адаптирующихся тактильных рецепторов представлен, судя по рис. 4 статьи, всего одним электрическим импульсом в момент начала тактильной стимуляции (длительностью около



80 мкс) и еще одним импульсом (также около 80 мкс) при ее прерывании с латентным периодом 4,4 мс и пороговом уровне тактильной чувствительности 0,05—0,2 г/мм². К сожалению, скорость нанесения тактильного стимула авторы не указывают.

Приведенные нами значения порогового тактильного давления (525 кПа) в целом подтверждаются результатами, полученными другими авторами. Так, по данным Choi и коллег (2020), тактильный порог при стимуляции низкоинтенсивным сфокусированным ультразвуковым тактильным устройством был определен как минимальное давление, необходимое для вызова тактильного ощущения, и соответствовал 475 кПа. Как указывают авторы, тактильное ощущение может быть вызвано при незначительном смещении кожи (менее 3 мкМ) и скорости его развития выше 1,56 мм/с (>0,00156 м/с). Результаты наших исследований свидетельствуют, что выводы Choi и соавторов (2020) могут быть распространены и на принципиально более высокие скорости тактильной стимуляции (0,32—0,33 м/с), а также на рецепторное поле исследуемой области кожи. В этой связи, с нашей точки зрения, при характеристике интенсивности тактильной стимуляции, помимо силы, развиваемой тактильным стимулом, необходимо дополнительно использовать еще один параметр — силу, сопоставленную со скоростью ее развития (в системе СИ это *Ньютон в секунду*, Н·с). Особенно важно учитывать такой параметр при определении порога ТМР. На это обстоятельство, хотя вскользь и в отношении электрофизиологического ответа рецепторов, указывается в работе Choi и коллег (2020). С учетом данного обстоятельства, интенсивность тактильного раздражения в нашей работе соответствовала значению этого параметра 0,122 Н·с (волосок № 1), 0,53 Н·с (волосок № 2), 1,23 Н·с (волосок № 3) и 1,8 Н·с (волосок № 4). Следовательно, порог раздражения, выраженный в таких единицах, соответствовал значению 0,122 Н·с.

Установленный в настоящей работе факт независимости латентного периода тактильно-моторной реакции от длительности тактильного стимула, по-видимому, можно объяснить фазным характером скоротечного рецепторного ответа быстро адаптирующихся тактильных рецепторов. В таком случае для формирования осознанного тактильного ощущения, а значит и запуска ТМР, достаточно лишь ограниченного числа нервных импульсов, генерирующихся в первые моменты тактильного контакта.

Второй вывод, сделанный на основании результатов наших экспериментов, можно сформулировать следующим образом: *характер зависимости латентного периода тактильно-моторной реакции от интенсивности тактильного стимула описывается логарифмическим уравнением и подчиняется основному психофизическому закону Вебера-Фехнера: интенсивность ощущений прямо пропорциональна логарифму интенсивности стимула.* Следует отметить, что уровень ощущения в нашем случае *a priori* соответствует значению латентного периода ТМР (чем выше скорость сенсомоторной реакции, тем более выражен физиологический эффект), а интенсивность раздражения — давлению, оказываемому на кожу тактильным стимулом.

Обсуждая результаты наших исследований, необходимо отметить, что в отличие от других типов сенсомоторных реакций (например, зрительно- или аудиомоторной) тактильно-моторная реакция в классическом исполнении «сила тактильного стимула — латентный период реакции» практически не изучалась. Это связано, по-видимому, преимущественно с технически сложным устройством тактильного стимулятора, в частности с возможностью дозировки силы тактильного стимула и его длительности, особенно последней. В литературе встречаются отрывочные сведения о латентном периоде ТМР. Так, по данным Kim и кол-



лег (Kim et al., 2014), скорость тактильно-моторной реакции в сравнительных исследованиях эффективности обучения перцептивной (зрительной) и тактильно-моторной реакций показали, что латентный период тактильной реакции в процессе обучения постепенно снижается и достигает на конечном этапе 450—420 мс. При этом процесс обучения был более эффективен для тактильного анализатора. Однако кривая «Сила — эффект» в данной работе не исследовалась. С этой точки зрения данные, полученные в настоящей работе, представляют определенный интерес. Прежде всего, в одном опыте были одновременно измерены значения латентного периода ТМР при разной длительности тактильного стимула (20 мс и 40 мс) и развиваемого при этом тактильного давления, начиная от пороговой величины (около 525 кПа) до сверхпороговой (4542 кПа). Отметим, что давление, оказываемое тактильным волоском № 1 (525 кПа), может рассматриваться как близкое к пороговой величине (Choi et al., 2020). Естественно, что такой вывод справедлив для условий нашего опыта, прежде всего с учетом места приложения тактильной стимуляции (область подушечки фаланги мизинца) и скорости ее развития (0,32—0,33 м/с). О пороговой силе раздражения, равной 525 кПа, свидетельствует также факт периодических пропусков испытуемыми реакций (от 2 до 4 из 15) на предъявление тактильного стимула. Такое явление наблюдается в том случае, когда сенсорный стимул очень близок к пороговому.

Отдельного обсуждения требует вопрос о характере зависимости «величина тактильного давления — значение латентного периода». Предварительным условием возможности выявления характера такой зависимости является широкий диапазон значений аргумента (величины давления). В нашем случае использовали тактильную стимуляцию интенсивностью от пороговой величины (525 кПа) до сверхпороговой (4542 кПа), т. е. различающейся в 8,7 раза. Анализ показал, что такая зависимость при всех условиях стимуляции (длительность стимулов 20 мс и 40 мс) с высокой степенью статистической значимости описывается логарифмическим уравнением. Если принять за аксиому, что латентный период тактильно-моторной реакции отражает интенсивность тактильного ощущения, то можно прийти к заключению о соответствии выявленной зависимости основному психофизиологическому (психофизическому) закону Вебера-Фехнера: интенсивность ощущений прямо пропорциональна логарифму интенсивности стимула. Однако характер зависимости «давление — латентный период» в исследуемом диапазоне точно так же хорошо описывается и степенной функцией, что, впрочем, не противоречит закону Вебера-Фехнера (Fechner, 1966) и согласуется с мнением Stevens (Stevens, 1957) о применимости этого закона для средних значений интенсивности ощущений.

Полученные в настоящем исследовании результаты могут быть использованы при выяснении глубинных механизмов организации тактильного анализатора.

Заключение

1. Латентный период тактильно-моторной реакции в рамках исследованного диапазона длительности стимула 20 мс и 40 мс при скорости тактильной стимуляции 0,122 Н·с не зависит от продолжительности стимула и определяется лишь величиной тактильного давления.

2. Пороговое ощущение (область подушечки фаланги мизинца) проявляется при тактильном давлении 525 кПа при скорости тактильной стимуляции 0,122 Н·с и характеризуется латентным периодом тактильно-моторной реакции 291—312 мс.



3. Характер зависимости латентного периода тактильно-моторной реакции от интенсивности тактильного стимула (тактильного давления) описывается логарифмическим уравнением при высоком значении коэффициента детерминации ($R^2 = 0,98 \div 0,99$) и в рамках значений исследованного диапазона «тактильное давление — латентный период» согласуется с основным психофизическим законом Вебера-Фехнера.

Список источников / References

1. Барабаншиков, В.А. (2009). Онтологическая парадигма исследований восприятия *Психологический журнал*, 30(5), 81—95.
Varabanshchikov, V.A. (2009). Ontological paradigm in perception study. *Psychological Journal*, 30(5), 81—95. (In Russ.)
2. Бойко, Е.И. (1964). *Время реакции человека: История, теория, современное состояние и практическое значение хронометрических исследований*. М.: Медицина.
Boiko, E.I. (1964). *Human reaction time: History, theory, current state and practical significance of chronometric research*. Moscow: Meditsina. (In Russ.)
3. Девицина, Г.В., Лапшин, Д.Н. (2020). Электрофизиологическое исследование тактильной чувствительности у карповых рыб (Cyprinidae). *Журнал эволюционной биохимии и физиологии*, 56(4), 303—312. <https://doi.org/10.31857/S004445292004004X>
Devitsina, G.V., Lapshin, D.N. (2020). Electrophysiological study of tactile sensitivity in carp fishes (Cyprinidae). *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*, 56(4), 303—312. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S004445292004004X>
4. Забродин, Ю.М., Лебедев, А.Н. (1977). *Психофизиология и психофизика*. М.: Наука.
Zabrodin, Yu.M., Lebedev, A.N. (1977). *Psychophysiology and psychophysics*. Moscow: Nauka. (In Russ.)
5. Ильинский, О.Б. (1975). *Физиология сенсорных систем. Часть третья. Физиология механорецепторов*. Л.: Наука. (серия «Руководство по физиологии»). URL: <https://studfile.net/preview/21495650/> (дата обращения: 12.12.2024)
Ilyinsky, O.B. (1975). *Physiology of sensory systems. Part three. Physiology of mechanoreceptors*. Leningrad: Nauka. (Series “Manual of Physiology”). (In Russ.). URL: <https://studfile.net/preview/21495650/> (viewed: 12.12.2024)
6. Камкин, А., Каменский, А. (Ред.). (2004). *Фундаментальная и клиническая физиология*. М.: Академия.
Kamkin, A., Kamensky, A. (Eds.). (2004). *Fundamental and clinical physiology*. Moscow: Academia. (In Russ.)
7. Романчук, В.М. (2022). Об адекватности психофизических измерений. *Экспериментальная психология*, 15(3), 213—221. <https://doi.org/10.17759/exppsy.2022150314>
Romanchuk, V.M. (2022). On the adequacy of psychophysical measurements. *Experimental psychology (Russia)*, 15(3), 213—221. (In Russ.). <https://doi.org/10.17759/exppsy.2022150314>
8. Соболев, В.И. (2020). Характеристика латентных периодов и параметров variability составных элементов простой зрительно-моторной реакции (электромиографическое исследование). *Физиология человека*, 46(4), 30—43. <https://doi.org/10.31857/S0131164620020174>
Sobolev, V.I. (2020). Characteristics of Latent Periods and Variability Parameters of Elements of a Simple Visuomotor Reaction: an Electromyographic Study. *Human Physiology*, 46(4), 30—43. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0362119720020176>
9. Соболев, В.И., Попов, М.Н. (2022). Измерение длительности фазы формирования физиологического феномена как предиктора осознанного ощущения при зрительно-моторной реакции “Go / No-go” типа в парадигме обратной маскировки. *Экспериментальная психология*, 15(4), 231—245. <https://doi.org/10.17759/exppsy.2022150415>
Sobolev, V.I., Popov, M.N. (2022). Measuring the Duration of the Phase of the Formation of a Physiological Phenomenon as a Predictor of Conscious Sensation at the Visual-Motor Reaction “Go / No-Go” — Type in the Paradigm of Backward Masking. *Experimental Psychology (Russia)*, 15(4), 231—245. (In Russ.). <https://doi.org/10.17759/exppsy.2022150415>
10. Соболев, В.И., Попов, М.Н., Труш, В.В. (2024). Независимость латентного периода простой тактильно-моторной реакции от длительности тактильного стимула. *Ученые записки Крымского*



- федерального университета имени В.И. Вернадского. *Биология. Химия*, 10(4), 196—204. <https://doi.org/10.29039/2413-1725-2024-10-4-196-204>
- Sobolev, V.I., Popov, M.N., Trush, V.V. (2024). The independence of the latent period of a simple tactile-motor reaction from the duration of the tactile stimulus. *Scientific notes of the Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky. Biology. Chemistry*, 10(4), 196—204. (In Russ.). <https://doi.org/10.29039/2413-1725-2024-10-4-196-204>
11. Шмидт, Р. (Ред.) (1984). *Основы сенсорной физиологии*. Пер. с англ. М.: Мир.
Shmidt, R. (Ed.) (1984). *Fundamentals of Sensory Physiology*. Transl. from Engl. Moscow: Mir. (In Russ.)
 12. Abaira, V.E., Ginty, D.D. (2013). The Sensory Neurons of Touch. *Neuron*, 79(4), 618—639. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuron.2013.07.051>
 13. Choi, J., Yook, S., Kim, I.Y., et al. (2020). Quantification of Displacement for Tactile Sensation in a Contact-type Low Intensity Focused Ultrasound Haptic Device. *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*, 18(1), 1—8. <https://doi.org/10.1145/3422820>
 14. Darlington, C., Donaldson, I.M. (1973). Dose threshold for small displacements of the finger pad depend on velocity. *The Journal of Physiology*, 229(1), 21P—22P.
 15. Fechner, G.T. (1966). *Elements of psychophysics* (H.E. Adler, Trans.). New York: Holt, Rinehart and Winston. (Original work published 1860).
 16. Handler, A., Ginty, D.D. (2021). The mechanosensory neurons of touch and their mechanisms of activation. *Nature Reviews Neuroscience*, 22, 521—537. <https://doi.org/10.1038/s41583-021-00489-x>
 17. Johansson, R.S., Vallbo, A.B. (1979a). Detection of tactile stimuli. Thresholds of afferent units related to psychophysical thresholds in the human hand. *The Journal of Physiology*, 297(1), 405—422. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1979.sp013048>
 18. Johansson, R.S., Vallbo, A.B. (1979b). Tactile sensibility in the human hand: relative and absolute densities of four types of mechanoreceptive units in glabrous skin. *The Journal of Physiology*, 286, 283—300. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1979.sp012619>
 19. Kim, D., Johnson, B.J., Gillespie, R.B., Seidler, R.D. (2014). The effect of haptic cues on motor and perceptual based implicit sequence learning. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 130. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00130>
 20. Knibestöl, M. (1973). Stimulus-response functions of rapidly adapting mechanoreceptors in the human glabrous skin area. *The Journal of Physiology*, 232(3), 427—452.
 21. Lindblom, U. (1965). Properties of touch receptors in distal glabrous skin of the monkey. *The Journal of Neurophysiology*, 28(5), 966—985.
 22. Lindblom, U., Lindström, B. (1976). Tactile thresholds of normal and blind subjects on stimulation of finger pads with short mechanical pulses of variable amplitude. In: Y. Zotterman (Ed.), *In Wenner-Gren Center International Symposium Series, Sensory Functions of the Skin in Primates*, Pergamon, (pp. 105—112).
 23. Mackay, D.M. (1963). Psychophysics of perceived intensity: A theoretical basis for Fechner's and Stevens' laws. *Science*, 139, 1213—1216. <https://doi.org/10.1126/science.139.3560.1213-a>
 24. Rollman, G.B. (1973). Tactile stimulation: Psychophysical studies of receptor function. *Percept Psychophysics*, 13, 81—86. <https://doi.org/10.3758/BF03207238>
 25. Stevens, S.S. (1957). On the psychophysical law. *Psychological Review*, 64(3), 153—181. <https://doi.org/10.1037/h0046162>

Информация об авторах

Валерий Иванович Соболев, доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры здоровья и реабилитации Гуманитарно-педагогической академии (филиал), Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского (ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»), Ялта, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9318-5224>, e-mail: v.sobolev@mail.ru

Вера Владимировна Труш, доктор биологических наук, кандидат медицинских наук, доцент, заведующая кафедрой физиологии и биофизики, Донецкий государственный университет (ФГБОУ ВО ДонГУ), Донецк, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8514-8431>, e-mail: ver.trush@yandex.ru



Максим Николаевич Попов, кандидат педагогических наук, доцент, заведующий кафедрой здоровья и реабилитации Гуманитарно-педагогической академии (филиал), Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского (ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»), Ялта, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7387-521X>, e-mail: maks.popov@mail.ru

Information about the authors

Valery I. Sobolev, Doctor of Science in Physiology, Professor, Department of Health and Rehabilitation, Academy of the Humanities and Pedagogics (branch), V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Yalta, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9318-5224>, e-mail: v.sobolev@mail.ru

Vera V. Trush, Doctor of Biological Sciences, Head of the Department of Physiology and Biophysics, Donetsk State University, Donetsk, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8514-8431>, e-mail: ver.trush@yandex.ru

Maxim N. Popov, PhD in Pedagogical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Health and Rehabilitation, Academy of the Humanities and Pedagogics (Branch), V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Yalta, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7387-521X>, e-mail: maks.popov@mail.ru

Вклад авторов

Соболев В.И. — идеи исследования; аннотирование, написание и оформление рукописи; планирование исследования; контроль за проведением исследования; изготовление экспериментальной установки.

Труш В.В. — применение статистических, математических и других методов для анализа данных; проведение эксперимента; сбор и анализ данных; изготовление экспериментальной установки.

Попов М.Н. — проведение эксперимента, изготовление экспериментальной установки.

Все авторы приняли участие в обсуждении результатов и согласовали окончательный текст рукописи

Contribution of the authors

Valery I. Sobolev — ideas; annotation, writing and design of the manuscript; planning of the research; control over the research; construction of the experimental setup.

Vera V. Trush — application of statistical, mathematical and other methods for data analysis; conducting the experiment; data collection and analysis; construction of the experimental setup.

Maxim N. Popov — conducting the experiment, construction of the experimental setup.

All authors participated in the discussion of the results and approved the final text of the manuscript.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Декларация об этике

Исследование было рассмотрено и одобрено Этическим комитетом Гуманитарно-педагогической академии (филиал) ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского» в г. Ялте. (протокол № 1 от 12.01.2024).

Ethics statement

The study was reviewed and approved by the Ethics Committee of Humanities and Education Science Academy (Branch) of V.I. Vernadsky Crimean Federal University (report no. 1, 2024/01/12).

Поступила в редакцию 09.01.2025

Поступила после рецензирования 16.05.2025

Принята к публикации 09.06.2025

Опубликована 30.03.2026

Received 2025.01.09

Revised 2025.05.16

Accepted 2025.06.09

Published 2026.03.30