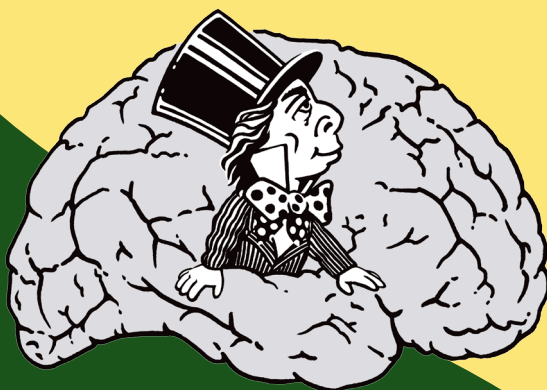


# КОГНИТИВНАЯ НАУКА

В МОСКВЕ



НОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

МАТЕРИАЛЫ  
КОНФЕРЕНЦИИ  
2023

Под ред. Е.В. Печенковой, М.В. Фаликман, А.Я. Койфман

УДК 159.9  
ББК 88.25  
К57

Когнитивная наука в Москве: новые исследования. Материалы конференции 21 – 22 июня 2023 г. Под ред. Е.В. Печенковой, М.В. Фаликман, А.Я. Койфман. – М.: ООО «Буки Веди», Московский институт психоанализа. 2023 г. – 604 стр.

© Авторы статей, 2023

ISBN 978-5-4465-3880-5

УДК 159.9  
ББК 88.25

ISBN 978-5-4465-3880-5

© Авторы статей, 2023

## АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПРИНЯТИЯ МОТОРНОГО РЕШЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Е. А. Лапшина (1), В. А. Аксиотис (1), А. Е. Осадчий (1, 2), А. В. Тумялис\* (1, 2)  
[atumyalis@gmail.com](mailto:atumyalis@gmail.com)

1 – НИУ ВШЭ, Москва; 2 – ФГБУ «Центр мозга и нейротехнологий»  
ФМБА России, Москва

**Аннотация.** Время реакции (ВР) используется для изучения различных когнитивных и моторных процессов. В настоящей работе мы предлагаем алгоритм расчета индивидуальной длительности периода выбора реакции. Алгоритм основывается на двух положениях. Во-первых, независимость этапов принятия моторного решения и выполнения реакции. Во-вторых, возможность переноса процессов принятия решения в подготовительный период (ПП). На основе теории оптимального контроля алгоритм итеративно подстраивает длительность ПП для минимизации ВР. Испытуемые выполняли задание с выбором из двух или четырех альтернатив ответов в разных блоках. Результаты показали, что для четырех альтернатив реакции длительность ПП была больше по сравнению с условием с двумя альтернативами ответа. Также для условия с двумя альтернативами ответов длительность ПП снижается после первого блока и не изменяется в дальнейшем, что свидетельствует о процессах адаптации параметров модели. Для ВР обнаружен значимый эффект условия, в соответствии с которым ВР для условия четырех альтернатив ответов было больше по сравнению с условием двух альтернатив ответов. Отсутствие значимой временной динамики свидетельствует об успешном переносе подготовительных процессов, не привязанных к выполнению реакции, в ПП. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о высокой достоверности и устойчивости расчета оптимальной индивидуальной длительности ПП в зависимости от условий задания.

**Ключевые слова:** время реакции, принятие решения, адаптивный алгоритм, оптимальный контроль, выбор реакции

Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ в 2023 году.

### Введение

Время реакции (ВР) используется для изучения когнитивных и моторных процессов. Выделение длительности этапов между восприятием стимула и результатом действия является непростой задачей: они могут полностью или частично перекрываться, испытывать общие влияния со стороны предыдущего действия, предсказания результата действия или плана последующего действия. Отношения между количеством вариантов ответа и временем принятия решения описываются законом Хика. Он определяет время, необходимое человеку для принятия решения, исходя из возможных вариантов ответа: увеличение числа вариантов выбора будет логарифмически увеличивать время принятия решения (Proctor, Schneider, 2018). Время реакции в данном случае используется как конечный результат всех процессов между стимулом

и реакцией, следовательно выделить принятие решения как целевой процесс, отличный от выполнения моторной программы, может быть проблематично.

В настоящей работе мы предлагаем алгоритм расчета индивидуальной длительности периода принятия решения. Структура пробы включала подсказку, императивный сигнал и реакцию. Период между подсказкой и императивным сигналом включает процессы принятия решения и обозначается как подготовительный период (ПП), период между императивным сигналом и регистрацией реакции – как время реакции. Алгоритм основывается на двух положениях. Во-первых, независимость этапов принятия моторного решения и выполнения реакции (Haith et al., 2016). Во-вторых, возможность переноса процесса выбора ответа из заданных альтернатив в подготовительный период (Woods et al., 2015; Soghojan et al., 2022). На основе теории оптимального управления (Kirk, 2004) алгоритм итеративно подстраивает длительность подготовительного периода для оптимизации времени реакции. Под оптимизацией мы понимаем соблюдение двух условий: во-первых, перемещение в подготовительный период процессов принятия решения, не привязанных жестко к выполнению реакции; во-вторых, минимизацию периода ожидания императивного сигнала. Другими словами, наша задача – уменьшить время ожидания императивного сигнала при завершённой подготовке реакции.

## Методика

Участниками исследования стали 37 человек (возраст =  $21.2 \pm 2.25$  года, 14 мужчин).

Стимулами были четыре желтые фигуры: квадрат, ромб, треугольник, перевернутый треугольник. Исследование включало пять блоков заданий: 1. Простое время реакции (SRT) – нажимать на одну кнопку при появлении любой фигуры. 2. Время реакции выбора из двух альтернатив (CRT2) – ромб и квадрат связаны с нажатием на левую кнопку, треугольники – на правую. 3. Время реакции выбора из четырех альтернатив (CRT4) – каждая фигура связана с нажатием на отдельную кнопку. 4. Адаптивный блок с выбором из двух альтернатив ответа. 5. Адаптивный блок с выбором из четырех альтернатив ответа. Для половины испытуемых соотношение стимулов и реакций были инвертированы. Для ответов испытуемые использовали указательные пальцы или указательные и средние пальцы обеих рук.

Первые три блока после тренировочной сессии включали 48 проб, адаптивные – 144.

Структура проб в блоках с адаптивным алгоритмом была следующей. Предъявлялся стимул зеленого цвета, и при смене его цвета на желтый (императивный сигнал) испытуемый производил ответ. Длительность предъявления стимула зеленого цвета составляет подготовительный период, период от смены цвета стимула до регистрации нажатия на кнопку составляет время реакции. Длительность подготовительного периода изменялась в зависимости от времени реакции и точности ответа.

Алгоритм расчета длительности подготовительного периода производился на основе теории оптимального управления. Зависимой переменной выступала

ло время реакции, контролирующей переменной — длительность подготовительного периода. Модель процесса:

$$BP_{n+1} = A \times BP_n + B \times (ПП_n - ПП_{n+1}),$$

где  $A = B = 1$  — скаляры фазового перехода состояния системы при предположении, что математическое ожидание суммы  $BP$  и  $ПП$  является постоянным,  $BP$  — время реакции,  $ПП$  — длительность подготовительного периода.

На втором этапе был использован фильтр Калмана для выделения «чистого», или оцененного, времени реакции ( $\hat{z}_n$ ), в котором учитываются параметры неопределенности процесса.

На третьем этапе рассчитывалось значение управляющей переменной. Формула расчета подготовительного периода ( $ПП$ ) в следующей пробе:

$$ПП_{n+1} = ПП_n + dz_n \times K_n,$$

где  $n$  — номер пробы;  $dz = \hat{z}_n - \hat{z}_{n-1}$  — разница между оцененным  $BP$  в предыдущей и настоящей пробе;  $K_n$  — коэффициент для управляющей переменной:

$$K_n = 0.5 + \text{sign}(dz_n) \times 0.05 - \text{sign}(dz_n) \times 0.01 / \hat{z}_n.$$

Таким образом, алгоритм сглаживает время реакции, рассчитывает его прирост — и на этой основе длительность подготовительного периода: отрицательные значения прироста (то есть  $\hat{z}_{n-1} > \hat{z}_n$ ) приводят к уменьшению длительности  $ПП$  и увеличению  $BP$ , и наоборот.

Для расчета соотношения сигнал/шум (ССШ) использовалась следующая формула:

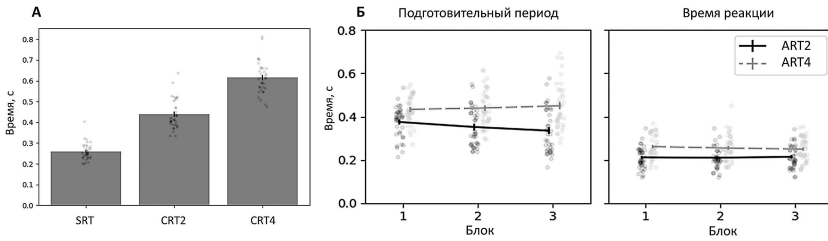
$$\text{ССШ} = \log_{10}((\text{среднее } BP)^2 / (\text{ст. откл. } BP)^2).$$

ССШ больше единицы может служить показателем выделения сигнала из шума.

## Результаты

**Анализ контрольных условий.** Производился RM ANOVA (с поправкой степеней свободы Хьюна-Фельдта) по данным времени простой реакции (SRT), реакции с двумя и четырьмя альтернативами выборов реакции (CRT2 и CRT4). Обнаружен значимый эффект ( $F(1.953, 66.567) = 438.9, p < .001, \eta_p^2 = .93$ ). Время реакции линейно зависит от логарифма числа альтернатив в точном соответствии с законом Хика (Proctor, Schneider, 2018), рис. 1А.

**Анализ подготовительного периода и времени реакции в адаптивных условиях.** Результаты были разделены на три блока по 48 стимулов и усреднены. Производился RM ANOVA с факторами «Период» ( $ПП, BP$ ), «Условие» (2, 4) и «Блок» (1, 2, 3). Обнаружены значимые главные эффекты «Периода» ( $F(1, 36) = 338.5, p < .001, \eta_p^2 = .90$ ) и «Условия» ( $F(1, 36) = 94.1, p < .001, \eta_p^2 = .72$ ), а также взаимодействия «Период»  $\times$  «Условие» ( $F(1, 36) = 20.6, p < .001, \eta_p^2 = .36$ ),



**Рисунок 1.** А. Средние значения времени реакции в контрольных условиях, точками обозначены индивидуальные средние значения. Б. Средние  $\pm$  SEM значения для подготовительного периода и времени реакции для адаптивных условий двух и четырех альтернатив выбора ответа, разделенные на три блока; точками обозначены индивидуальные средние значения

«Условие»  $\times$  «Блок» ( $F(1.533, 55.172) = 7.14, p = .004, \eta_p^2 = .17$ ) и «Период»  $\times$  «Условие»  $\times$  «Блок» ( $F(1.681, 60.510) = 15.1, p < .001, \eta_p^2 = .30$ ).

На рис. 1Б приведены значения  $M \pm SEM$  для подготовительного периода и времени реакции для условий двух и четырех альтернатив выбора ответа в трех блоках.

Частные ANOVA показали, что для подготовительного периода значимо взаимодействие «Условие»  $\times$  «Блок» ( $F(1.448, 52.143) = 17.5, p < .001, \eta_p^2 = .33$ ), свидетельствующее о влиянии времени адаптации на различия между условиями. ANOVA в каждом условии показали, что в условии с четырьмя альтернативами ответов временная динамика не значима. В то же время условие с двумя альтернативами ответов имеет значимый фактор «Блока» ( $F(1.345, 48.415) = 11.75, p < .001, \eta_p^2 = .25$ ). Post-hoc сравнения свидетельствуют о том, что время реакции больше в первом блоке и меньше во втором ( $t(36) = 2.79, p_{\text{bonf}} = .020$ , Cohen's  $d = 0.25$ ) и третьем ( $t(36) = 4.83, p_{\text{bonf}} < .001$ , Cohen's  $d = 0.46$ ), которые между собой не различаются ( $t(36) = 2.04, p_{\text{bonf}} = .137$ , Cohen's  $d = 0.19$ ).

Для времени реакции значим эффект «Условия» ( $F(1, 36) = 57.6, p < .001, \eta_p^2 = .62$ ), свидетельствующий о большем времени реакции для условий с четырьмя альтернативами по сравнению с условием с двумя альтернативами ответов.

Также мы посчитали значение соотношения сигнал/шум (ССШ) для ПП и ВР в каждом условии и блоке. Обнаружен значимый эффект периода ( $F(1, 36) = 2152.3, p < .001, \eta_p^2 = .984$ ), в соответствии с которым  $ССШ\text{-}ВР = 1.08 \pm 0.05$  и  $ССШ\text{-}ПП = 2.42 \pm 0.05$ .

**Анализ времени реакции для SRT (simple reaction task) и условий с адаптивным алгоритмом.** В анализе использованы данные третьего блока адаптивных условий с двумя и четырьмя альтернативами выбора ответа и простое время реакции контрольного условия. Главный эффект оказался значимым ( $F(2, 68) = 13.26, p < .001, \eta_p^2 = .28$ ). SRT больше по сравнению с двумя альтернативами выбора ответа ( $t(36) = 5.01, p_{\text{bonf}} < .001$ ) и не отличается от условия с четырьмя альтернативами выбора ответа ( $t(36) = 1.49, p_{\text{bonf}} = .426$ ).

## Обсуждение и выводы

В настоящем исследовании мы предлагаем обновленный вариант алгоритма, опубликованного ранее (Soghoian et al., 2022). Новая версия основана на теории оптимального управления и проверена в задаче с увеличением сложности выбора ответа.

Соотношение сигнал/шум для подготовительного периода и времени реакции указывает, что адаптивный алгоритм позволяет эффективно выделить длительность подготовительного периода ( $ССШ = 2.42 \pm 0.05$ ) и в то же время снизить время реакции до уровня шума ( $ССШ = 1.08 \pm 0.05$ ).

Результаты свидетельствуют о том, что адаптивный алгоритм дает возможность выделять длительность подготовительного периода реакции, включающую процессы выбора реакции, не жестко прикрепленные к моменту ее выполнения (например, динамические и кинетические аспекты движения). Для четырех альтернатив реакции длительность подготовительного периода была больше по сравнению с условием с двумя альтернативами ответа. Выбор 0.4 секунды для стартовых значений длительности подготовительного периода в условии с четырьмя альтернативами ответов был оптимален, для условия с двумя альтернативами длительность ПП снижается после первого блока и не изменяется в дальнейшем, что свидетельствует о процессах адаптации параметров модели оптимального контроля.

Более сложная реакция требует больше времени для программирования и реализации (Woods et al., 2015; Maslovat et al., 2019). В настоящем исследовании обнаружено большее ВР для четырех по сравнению с двумя альтернативами ответов. Выбор одной реакции из четырех более сложен, чем из двух, что соответствует ранее полученным данным (Shin, Proctor, 2018). Отсутствие значимой временной динамики свидетельствует об успешном переносе процессов, не привязанных к выполнению движения, из времени реакции в подготовительный период.

Также время реакции в адаптивном условии с двумя альтернативами ответом ниже по сравнению с простым временем реакции в контрольном условии. Возможно, в адаптивном условии была большая определенность в отношении времени предъявления императивного стимула. Для простого времени реакции длительности межстимульного интервала и крестика перед предъявлением стимула случайно изменялись, а в адаптивном условии испытуемые могли с большей достоверностью предсказать появление императивного стимула.

Таким образом, хотя алгоритм требует дальнейшего совершенствования, полученные результаты соотношения сигнал/шум и средней длительности подготовительного периода и времени реакции свидетельствуют о возможности достоверного выделения длительности подготовительного периода в зависимости от условий задания.

## Литература

Haith A.M., Pakpoor J., Krakauer J.W. Independence of movement preparation and movement initiation // *The Journal of Neuroscience*. 2016. Vol. 36. No. 10. P. 3007–3015. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.3245-15.2016>

- Kirk D.* Optimal control theory: An introduction. Mineola, NY: Dover Publications, 2004.
- Maslovat D., Klapp S.T., Forgaard C.J., Chua R., Franks I.M.* The effect of response complexity on simple reaction time occurs even with a highly predictable imperative stimulus // *Neuroscience Letters*. 2019. Vol. 704. P. 62 – 66. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2019.03.056>
- Proctor R.W., Schneider D.W.* Hick's law for choice reaction time: A review // *Quarterly Journal of Experimental Psychology*. 2018. Vol. 71. No. 6. P. 1281 – 1299. <https://doi.org/10.1080/17470218.2017.1322622>
- Shin Y.K., Proctor R.W.* Evidence for distinct steps in response preparation from a delayed response paradigm // *Acta Psychologica*. 2018. Vol. 191. P. 42 – 51. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2018.08.010>
- Soghoyan G., Aksiotis V., Rusinova A., Myachykov A., Tumyalis A.* An adaptive paradigm for detecting the individual duration of the preparatory period in the choice reaction time task // *PLOS One*. 2022. Vol. 17. No. 9. P. e0273234. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0273234>
- Woods D.L., Wyma J.M., Yund E.W., Herron T.J., Reed B.* Factors influencing the latency of simple reaction time // *Frontiers in Human Neuroscience*. 2015. Vol. 9. P. 131. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00131>

## ALGORITHM FOR CALCULATING THE DURATION OF MOTOR DECISION MAKING BASED ON THE THEORY OF OPTIMAL CONTROL

E. A. Lapshina (1), V. A. Aksiotis (1), A. E. Ossadtschi (1, 2), A. V. Tumyalis\* (1, 2)  
[atumyalis@gmail.com](mailto:atumyalis@gmail.com)

1 – HSE University, Moscow;

2 – FSBI “Center of the brain and neurotechnologies” FMBA Russia, Moscow

**Abstract.** Reaction time (RT) is used to study various cognitive and motor processes. In this paper, we propose an algorithm for calculating the individual duration of the reaction selection period. The algorithm is based on two prepositions: the independence of motor decision making and reaction execution, and the possibility of decision making processes transferring to the preparatory period (PP). Based on the theory of optimal control, the algorithm iteratively adjusts the duration of PP to minimize RT. Participants performed a task with a choice of two or four alternative responses in different blocks. For four response alternatives, PP duration was longer compared to the condition with two response alternatives. For the condition with two alternatives, PP duration decreased after the first block and did not change further, indicating the adaptation of model parameters. A significant effect of condition was found for RT: RT in the four alternative condition was greater than in the two alternative condition. The unreliable time dynamics indicate the successful transfer of preparatory processes not tied to the execution of the reaction to the PP. The results indicate the high reliability and stability of the calculation of the optimal individual duration of the PP, depending on task conditions.

**Keywords:** reaction time, decision making, adaptive algorithm, optimal control, response selection

The study was implemented in the framework of the Basic Research Program at the National Research University Higher School of Economics (HSE University) in 2023.