

ЭЭГ ВО ВРЕМЯ ВЫБОРА ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРОСЛЕЖИВАЮЩИМИ ДВИЖЕНИЯМИ ГЛАЗ

Д. Г. Чжао* (1), А. Н. Васильев (1), Б. Л. Козырский (1), А. В. Исаченко (1, 2),
Е. В. Мельничук (1), Б. М. Величковский (1), С. Л. Шишкин (1)

chzhao@phystech.edu

1 – НИЦ «Курчатовский институт», Москва; 2 – МФТИ, Москва

Аннотация. В исследовании с участием 20 испытуемых сравнивали электроэнцефалограмму (ЭЭГ) при прослеживающих движениях глаз, используемых для намеренного выбора одного из подвижных объектов, а также при спонтанных прослеживающих движениях глаз и при выборе неподвижных объектов с помощью задержек взгляда на них. У всех испытуемых намеренный выбор сопровождался появлением в их ЭЭГ аналога волны ожидания, амплитуда которой была значительно более негативной, чем амплитуда ЭЭГ в том же временном диапазоне при спонтанном прослеживании без ожидания. Таким образом, данный «маркер намерения» может быть достаточно устойчивым к варьированию элементов интерфейса и допускать его разнообразные модификации. Это позволяет рассчитывать на возможность использования волны ожидания в разнообразных вариациях гибридного интерфейса глаз-мозг-компьютер. Отдельный интерес могут представлять наблюдения, касающиеся лямбда-волны – компонента ЭЭГ, возникающего вскоре после начала фиксации: ее амплитуда в условиях динамической фиксации взгляда на объекте – при его прослеживании – не снизилась в сравнении с обычными статическими фиксациями на неподвижном объекте. Это указывает на сходство процесса зрительного восприятия в начале фиксаций обоих типов, а также на точность привязки его начала во времени к началу прослеживания в случае восприятия подвижных объектов.

Ключевые слова: прослеживающие движения глаз, управление с помощью взгляда, управление глазами, интерфейсы человек-компьютер, человеко-машинное взаимодействие, электроэнцефалограмма, ЭЭГ, волна ожидания, лямбда-волна

Исследование частично поддержано грантом РФФИ, проект 18-19-00593 (разработка, адаптация и применение методов предобработки данных ЭЭГ и ЭОГ).

Прослеживающие движения глаз подробно изучались в исследованиях зрения и внимания (см., например, Schütz et al., 2011). При этом, как правило, предметом исследования были *спонтанные* прослеживающие движения, возникающие автоматически. Сравнительно недавно было предложено использовать регистрируемые айтрекером прослеживающие движения для управления техническими устройствами (Vidal et al., 2013): пользователь *намеренно* направляет взгляд на один из подвижных объектов и *намеренно* же удерживает взгляд на нем, пока не сработает алгоритм детекции прослеживания

и объект не оказывается «выбранным», о чем информирует изменение его яркости, цвета, формы и т.п. При «выборе» объекта выполняется связанная с ним команда. Так, если технология встроена в «умные часы» для управления музыкальным плеером, выбору разных объектов, демонстрируемых на экране часов, могут соответствовать изменение громкости, воспроизведение/пауза и т. п. (Esteves et al., 2015).

Такой способ человеко-машинного взаимодействия близок к давно используемой технологии «выбора» статических объектов с помощью удлиненных фиксаций взгляда на них. На управление прослеживанием распространяется и «проблема прикосновения Мидаса». Она состоит в том, что «управляющие» паттерны движений глаз встречаются и без намерения дать команду, поэтому спонтанная глазодвигательная активность вызывает ненужные срабатывания системы (Jacob, 1990). Как отметили Ihme & Zander (2011), когда пользователь намеренно задерживает взгляд для подачи команды, он ожидает срабатывания интерфейса, и в электроэнцефалограмме (ЭЭГ) возможно появление так называемой волны ожидания. Наша группа разработала способ выделения такой волны из ЭЭГ, синхронизированной с задержками взгляда (Шишкин и др., 2016; Shishkin et al., 2016). В этих случаях, однако, зрительная среда была статичной, тогда как проблема прикосновения Мидаса может быть более серьезной в присутствии подвижных объектов, непроизвольно привлекающих внимание. Более того, было неясно, как наличие таких потенциальных дистракторов может влиять на волну ожидания. Как ни странно, ЭЭГ при прослеживающих движениях глаз и тем более при их использовании для намеренного управления ранее практически не изучалась.

В предварительном исследовании (Zhao et al., 2018) мы наблюдали наминавший волну ожидания компонент ЭЭГ, который развивался при намеренном прослеживании объекта взглядом с целью его выбора. Однако когда инструкция не предполагала выбор объекта, а обратная связь отсутствовала, похожая волна также появлялась – вероятно, вследствие либо ожидания, либо оценки времени, спровоцированной инструкцией. Мы разработали режим, в котором такая активность исключалась, а также добавили режим с выбором неподвижных объектов. Это позволило в настоящей работе протестировать предположение о возможности различать спонтанные и намеренные прослеживания объектов по сопровождающей их ЭЭГ.

Методика

В исследовании приняли участие 20 здоровых добровольцев (11 мужчин, 9 женщин) в возрасте 20–52 лет (27 ± 7) лет. При записи ЭЭГ и электроокулограммы (ЭОГ) использовался энцефалограф NVX52 (МКС, Россия). ЭЭГ регистрировалась в 19 отведениях относительно объединенного ушного референта. Вертикальная и горизонтальная ЭОГ регистрировались биполярно. Взгляд также отслеживался с помощью айтрекера Tobii 4С (Tobii, Швеция), закрепленного на нижнем краю монитора, но в соответствии с имеющейся лицензией полученные с его помощью координаты взгляда могли использоваться только для обеспечения отклика зрительной среды на дви-

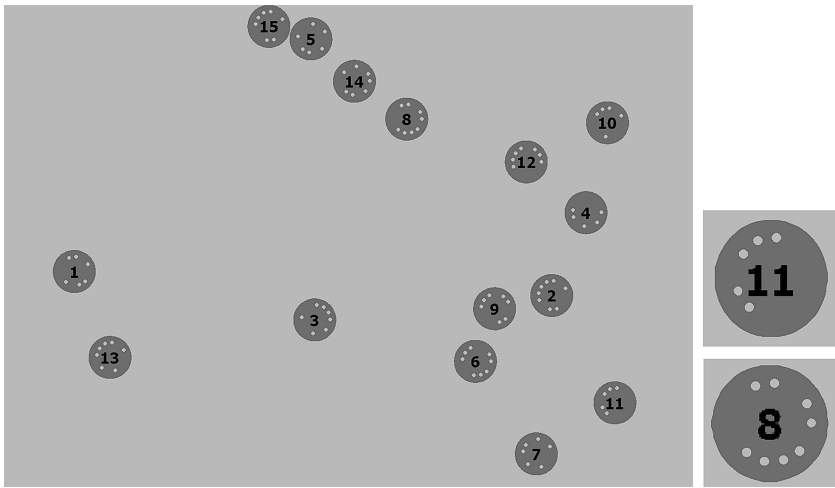


Рисунок 1. Скриншот экрана (слева) и примеры «шаров» (справа).

жения глаз в онлайн-режиме. Данные троих испытуемых были исключены из анализа в связи с проблемами технического характера.

Испытуемым в каждом условии (режиме) предъявлялись 15 пронумерованных серых кругов диаметром 2.8° (рис. 1). Круги содержали от 5 до 8 точек (рис. 1, справа; см. ниже режим СТ). В разговоре с испытуемыми круги называли «шары», поскольку предполагалось, что это поможет более естественно воспринимать их движение на экране. В «статическом» режиме (SSB) «шары» располагались в случайных позициях, а в «динамических» (SMB, FA, CT) перемещались по линейным траекториям со скоростью $6.8^\circ/\text{с}$, естественным образом меняя направление движения при соударении друг с другом или с краем поля.

В случайном порядке давались следующие задачи (режимы): (1) «Выберите подвижные шары» (Select moving balls, SMB) — выбрать с помощью взгляда 15 шаров в порядке возрастания номера, затем (только для испытуемых 7–20) в обратном порядке; (2) «Выберите неподвижные шары» (Select static balls, SSB) — то же, но при фиксированных позициях шаров; (3) «Поиск ускоренного шара» (Find accelerated, FA) — найти шар, который двигался на $1.3^\circ/\text{с}$ быстрее, чем остальные; (4) «Счет» (Counting task, CT) — найти пять шаров с указанным количеством точек и просуммировать их номера. Последние два режима были контрольными. Шар «выбирался», как только медиана расстояния от точки взгляда до центра шара, рассчитанная в окне длиной 867 мс, оказывалась менее 55 пикс. и была наименьшей среди всех шаров. В режимах с преднамеренным выбором (SMB, SSB) в момент «выбора» шар окрашивался в ярко-зеленый цвет, который сохранялся у него до выбора другого шара.

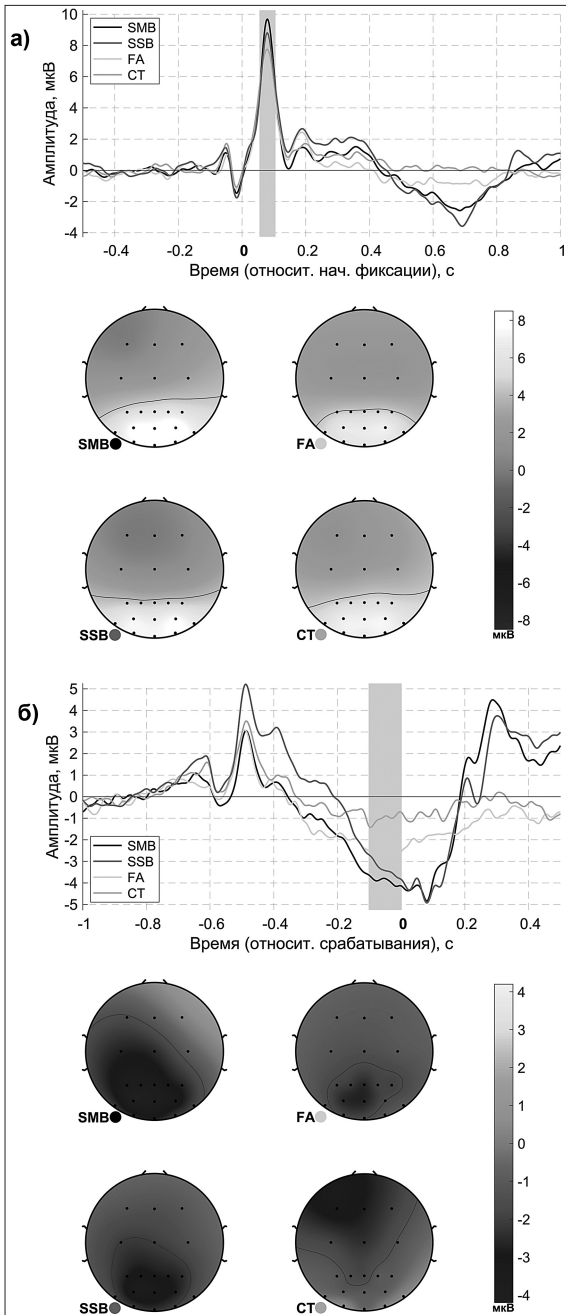


Рисунок 2. Усредненные по группе ($n = 17$) потенциалы:

а – синхронизация с началом статической фиксации или преслеживания (0 мс, определялось по ЭОГ); вверху – временной ход в Oz, внизу – топография амплитуды в окрестности лямбда-пики;

б – синхронизация с «выбором» (0 мс); вверху – временной ход в POz, внизу – топография амплитуды в последние 100 мс перед «выбором»; обратная связь при «выборе», дававшаяся испытуемым только в режимах SMB и SSB, во всех режимах выводилась в закрытый от них угол экрана, где регистрировалась фотодатчиком, сигнал от которого записывался синхронно с ЭЭГ

Результаты

Усредненные потенциалы представлены на рис. 2. Неожиданным оказалось отсутствие существенных различий между режимами SMB и SSB (выбор подвижных объектов прослеживанием и неподвижных – фиксациями). В начале фиксации/прослеживания во всех режимах наблюдался позитивный пик, очевидно, являющийся лямбда-волной – компонентом ЭЭГ, описанным для статических фиксаций, в которых, как предполагается, он отражает начало восприятия основного потока зрительной информации (рис. 2а). Амплитуда в Oz в окрестности этого пика (56 ... 104 мс) не зависела от режима (согласно однофакторной ANOVA, $F(3, 64) = 1.03, p = .3836$). Ближе к моменту срабатывания (рис. 2б) у всех испытуемых в режимах с намеренным выбором (SMB и SSB) в теменно-затылочной области наблюдалась негативная волна. Временной ход амплитуды в режиме FA был близок к этим режимам – вероятно, в связи с тем, что при наблюдении за предположительно ускоренным шаром испытуемые нередко *ждали*, когда такой шар окажется рядом с другим шаром (это упрощало оценку скорости). Однако в основном контрольном режиме СТ наблюдалась лишь небольшой сдвиг в негативную сторону. Амплитуда ЭЭГ в POz за 100 мс перед срабатыванием алгоритма выбора зависела от режима (согласно однофакторной ANOVA, $F(3, 64) = 4.71, p = .005$), при этом значимыми были лишь отличия режимов с намеренным выбором, SMB и SSB, от основного контрольного режима СТ (соответственно $p = .004$ и $p = .028$ по критерию Тьюки).

Заключение

Результаты, полученные в этом исследовании, позволяют предположить, что волна ожидания в ЭЭГ, которая развивается при ожидании пользователем визуальной обратной связи в интерфейсе «глазоуправления», может быть достаточно устойчивой к варьированию элементов интерфейса и допускать его разнообразные модификации, что позволяет рассчитывать на возможность ее использования в разнообразных вариациях гибридного интерфейса глаз – мозг – компьютер. Интерес для исследователей восприятия может представлять волна ЭЭГ в начале прослеживания движущегося объекта, сходство которой с лямбда-волной при статических фиксациях может указывать на значительную близость процесса зрительного восприятия в начале прослеживания и в начале статической фиксации.

Литература

- Шишкин С. Л., Свириной Е. П., Нурдин Ю. О., Федорова А. А., Трофимов А. Г., Слободской-Плюснин Я. Ю., Васильевская А. М., Величковский Б. М. Учитесь ждать! Условно-негативная волна поможет отдавать команды взглядом? // Когнитивная наука в Москве: новые исследования (Москва, 16 июня 2015 г.). 2015. С. 486–491. <http://conf.virtualcoglab.org/2015/Proceedings/MoscowCogSci2015Proceedings.pdf>
- Esteves A., Velloso E., Bulling A., Gellersen H. Orbits: Gaze interaction for smart watches using smooth pursuit eye movements // Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology – UIST'15. ACM Press, 2015. P. 457–466. doi:10.1145/2807442.2807499

Ihme K., Zander T.O. What you expect is what you get? Potential use of contingent negative variation for passive BCI systems in gaze-based HCI // *Affective Computing and Intelligent Interaction*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. P. 447 – 456.

[doi:10.1007/978-3-642-24571-8_57](https://doi.org/10.1007/978-3-642-24571-8_57)

Jacob R.J. What you look at is what you get: Eye movement-based interaction techniques // *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems Empowering people – CHI '90*. ACM Press, 1990. P. 11 – 18. [doi:10.1145/97243.97246](https://doi.org/10.1145/97243.97246)

Schütz A.C., Braun D.I., Gegenfurtner K.R. Eye movements and perception: A selective review // *Journal of Vision*. 2011. Vol. 11. No. 5. P. 9 – 9. [doi:10.1167/11.5.9](https://doi.org/10.1167/11.5.9)

Shishkin S.L., Nuzhdin Y.O., Svirin E.P., Trofimov A.G., Fedorova A.A., Kozyrskiy B.L., Velichkovsky B.M. EEG negativity in fixations used for gaze-based control: Toward converting intentions into actions with an eye-brain-computer interface // *Frontiers in Neuroscience*. 2016. Vol. 10. No. 528. [doi:10.3389/fnins.2016.00528](https://doi.org/10.3389/fnins.2016.00528)

Vidal M., Bulling A., Gellersen H. Pursuits: Spontaneous interaction with displays based on smooth pursuit eye movement and moving targets // *Proceedings of the 2013 ACM international joint conference on Pervasive and ubiquitous computing – UbiComp '13*. ACM Press, 2013. P. 439 – 448. [doi:10.1145/2493432.2493477](https://doi.org/10.1145/2493432.2493477)

Zhao D., Isachenko I., Melnichuk E., Shishkin S. Eye-brain-computer interfacing with smooth pursuit eye movements // *4th Int. Conf. BCI: Science and Practice*. Samara: 2018. P. 21.

AN EEG IN SELECTION OF MOVING OBJECTS WITH SMOOTH PURSUIT EYE MOVEMENTS

D. G. Zhao* (1), A. N. Vasilyev (1), B. L. Kozyrskiy (1), A. V. Isachenko (1, 2), E. V. Melnichuk (1), B. M. Velichkovsky (1), S. L. Shishkin (1)

chzhao@phystech.edu

1 – NRC “Kurchatov Institute”, Moscow; 2 – MIPT, Moscow

Abstract. In a study involving 20 participants, an electroencephalogram (EEG) was compared during the smooth pursuit eye movements used to intentionally select one of the moving objects, as well as in spontaneous pursuit and selection of the static objects with gaze fixations. Among all participants, intentional selection was accompanied in the EEG by an analogue of the expectancy wave, the amplitude of which was significantly more negative than the EEG amplitude in the same time range during the spontaneous pursuit without expectations. Thus, this “marker of intention” could be robust enough to the variation of interface elements and allow for various modifications of the interface. Therefore, the design of hybrid eye-brain-computer interfaces based on this “marker” might be quite versatile. In addition, an observation related to another EEG component, the lambda wave that is typically found at the beginning of gaze fixations, is also of interest. The amplitude of this wave did not decrease when the fixation was dynamic (in the pursuit conditions), compared to the usual static gaze fixations. This observation suggests that visual perception is similar at the beginning of both types of fixations, and that in the case of pursuit the start of the visual perception processes is precisely time-locked to the beginning of the pursuit.

Keywords: smooth pursuit eye movements, gaze-based control, gaze interaction, human-computer interface, human-machine interaction, electroencephalography, EEG, expectancy wave, lambda wave