

УДК 612.821.7

## ПСИХОМОТОРНЫЙ ТЕСТ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗРИТЕЛЬНО-МОТОРНОЙ КООРДИНАЦИИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ МОНОТОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПО ПРОСЛЕЖИВАНИЮ ЦЕЛИ

© 2011 г. В. Б. Дорохов, Г. Н. Арсеньев, О. Н. Ткаченко, Д. В. Захарченко,  
Т. П. Лаврова, В. В. Дементенко\*

Учреждение Российской академии наук Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН,  
\* Учреждение Российской академии наук Институт радиотехники и электроники РАН, Москва,  
e-mail: vbdorokhov@mail.ru

Поступила в редакцию 20.01.2010 г.

Принята в печать 18.10.2010 г.

Зрительно-моторная координация необходима для успешной операторской деятельности. Различные типы задач, таких как вождение автомобиля или работа оператора в стационарных условиях, требуют разнообразных координационных паттернов с различным уровнем взаимодействия между движениями глаз и рук. Разработан психомоторный тест для анализа нарушений зрительно-моторной координации, вызываемых снижением уровня бодрствования. Тест: целевым объектом служило небольшое круглое пятно (диаметром 14 мм), которое двигалось на экране монитора с постоянной медленной скоростью (12 мм/с) по круговой орбите — диаметром 70 мм и периодом 20 с. Испытуемые получали инструкцию: удерживать курсор “мыши” внутри целевого объекта. Выход курсора за пределы перемещающейся цели оценивался как ошибка. Уровень реактивности испытуемого тестировался редким предъявлением дополнительной движущейся цели, которую требовалось как можно быстрее догнать курсором “мыши” и нажать клавишу “мыши”. Траектория курсора “мыши” определялась с временным разрешением 120 Гц. Движения глаз регистрировались с помощью бесконтактной видеосистемы для исследования движений глаз (Eyegaze Development System, LC Technologies, USA), основанной на отражении инфракрасного света от роговицы глаза и позволяющей определять координаты направления взора с временным разрешением 120 Гц. Монотонный характер теста вызывал снижение уровня бодрствования и развитие дремотного состояния, что приводило к появлению ошибок через 30–40 мин от начала эксперимента. Динамика физиологического уровня бодрствования определялась электроэнцефалографически. Анализ временных характеристик медленных прослеживающих и быстрых саккадических движений глаз, а также движения руки показал их высокую чувствительность к снижению работоспособности оператора, вызываемой снижением уровня бодрствования. Дальнейшее развитие этого подхода будет способствовать разработке бесконтактного метода экспресс-диагностики критических уровней сонливости, а также для определения профессиональных характеристик человека оператора, требующих высокого уровня зрительно-моторной координации.

*Ключевые слова:* видеотрекинг, зрительно-моторная координация, психомоторный тест, саккадические и прослеживающие движения глаз, монотония, уровень бодрствования, ошибки деятельности.

## The Psychomotor Test for Research of Eye-Hand Coordination at Performance of Monotonous Activity on Tracking Target

V. B. Dorokhov, G. N. Arsenyev, O. N. Tkachenko, D. V. Zakharchenko,  
T. P. Lavrova, V. V. Dementienko

Institute for Higher Nervous Activity and Neurophysiology, Russian Academy of Sciences, Moscow,  
Institution of the Russian Academy of Sciences Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, Moscow,  
e-mail: vbdorokhov@mail.ru

Visual-motor coordination is necessary for successful performance of everyday activities. Many tasks, such as driving or operating devices in the workplace, require a variety of coordination patterns with different levels of compatibility between the eyes and the hand. The psychomotor test was developed which makes it possible to analyze visual-motor coordination disorders caused by a decrease in the level of wakefulness. A small circular target (14 mm in diameter) was moving with a low constant velocity (12 mm/s) in a circular trajectory (80 mm in diameter) with a period of 20 s. Subjects were instructed to keep the mouse-driven cursor inside a target, overstepping the limits of the moving target was considered as an error. To test the attention level, an additional stimulus was introduced which appeared for 3 seconds with an interval of 15 to 40 s. When the stimulus appeared, it was required to touch it with the cursor and click the mouse button. Cursor trajectories have a temporal resolution of 120 Hz. Eye movements were recorded with a PC-based Eyegaze Development System (LC Technologies, USA) measuring corneal reflectance with a collection rate of 120 Hz. Monotonous character of the test performance induced drowsiness and led to errors 25–30 minutes after the beginning of the experiment. Changes in physiological vigilance level was evaluated with EEG recording. Analysis of the dynamic characteristics of smooth and saccadic eye movements and hand movements showed their high sensitivity to a decrease in efficiency of operator's activity caused by a drop in the level of wakefulness. It is suggested that further development of this approach to measuring eye-hand coordination will promote working out a contactless method for the express diagnostics of the critical levels of drowsiness as well as for the definition of professional characteristics of an operator.

*Keywords: eye-tracking system, eye-hand coordination, psychomotor test, saccadic and smooth pursuit eye movements, monotonous activity, vigilance, level of wakefulness, performance errors.*

Зрительное восприятие доставляет человеку основную часть информации об окружающем мире, а управляющая взглядом система определяет, какая именно информация будет использована для дальнейших действий. Любое зрительное восприятие начинается с того, что глазодвигательная система переводит необходимый объект в зону лучшего видения глаза на фовеа, только после этого начинается зрительный анализ объекта и принимается решение о взаимодействии с этим объектом. Широко известны результаты экспериментов А.Л. Ярбуса [6] об изменении траектории взгляда при рассматривании картины в зависимости от выполняемого задания. Современные исследования в этой области показывают, как эффективность деятельности зависит от характеристик движения глаз, которые обеспечивают качество зрительного восприятия [16, 17, 22, 27, 28].

Зрительно-моторная координация обеспечивается тремя мозговыми системами [18, 19, 21]: 1) глазодвигательной, управляющей движениями глаз, 2) моторной системой, управляющей движениями конечностей, и 3) мозговой системой координирующей взаимодействие этих двух систем, центральной частью которой является мозжечок. Окуломоторный контроль движущихся объектов обеспечивается двумя типами движений глаз: саккадами и преслеживающими движениями [10, 11]. Вначале быстрые движения глаз — саккады — переводят целевой объект в зону наилучшего видения глаза (фовеа), а затем преслеживающие движения глаз стабилизируют проекцию движущегося

объекта на фовеа. При больших скоростях движущегося объекта и непредсказуемых изменениях его траектории механизма преслеживающих движений глаз становится недостаточно. В этом случае функционируют саккады другого типа, “ловящие” объект [9], роль которых заключается в быстром переводе взгляда на движущийся целевой объект, и только после этого продолжается отслеживание его медленными преслеживающими движениями глаз. Таким образом, для оптимального восприятия движущегося объекта необходимо координированное взаимодействие обоих типов движений глаз [10].

Нарушения зрительно-моторной координации, вызываемые ухудшением функционального состояния человека, приводят к ошибкам во взаимодействии субъекта с окружающим миром. Управление автомобильным транспортом [8, 14, 15] является одним из наиболее распространенных видов деятельности, когда нарушения этой координации имеют самые драматические последствия [14, 20, 23, 25]. Чаще всего причиной таких нарушений является снижение уровня бодрствования или фармакологическая интоксикация разной природы [14, 20, 23, 25]. Для диагностики засыпания водителей за рулем разрабатываются различные устройства контроля уровня бодрствования, основанные на регистрации и анализе различных физиологических показателей, коррелирующих со снижением уровня бодрствования [26]. Наиболее прямой способ

оценки функции внимания и его нарушений — это регистрация движения глаз и определение динамики направления взора. Поэтому недавно появившаяся методология видеотрекинга, позволяющая бесконтактно регистрировать движения глаз [1, 25], является в настоящее время одной из наиболее перспективных технологий для создания устройств диагностики контроля уровня бодрствования на транспорте и производстве. Несмотря на большое количество разработок с использованием видеотрекинга [26], промышленного образца таких устройств пока еще нет.

В большинстве исследований нарушения зрительно-моторной координации при состояниях со сниженной работоспособностью изучались на автомобильных симуляторах и при вождении автомобиля в реальных условиях [1, 8, 15, 16, 17, 24]. Для исследования нейрофизиологических механизмов нарушения зрительно-моторной координации использование автомобильных симуляторов недостаточно, так как не позволяет в полном объеме анализировать участие различных механизмов функционирования глазодвигательной системы [7, 22, 24, 27, 28]. Ранее нами было предложено несколько психофизиологических тестов [2–5], которые позволяли в течение 1 ч наблюдать нарушения однообразной монотонной деятельности, вызываемой снижением уровня бодрствования.

Учитывая опыт этих исследований, мы разработали тест [5, 12, 13] для изучения зрительно-моторной координации при выполнении однообразной деятельности по удержанию курсора “мыши” внутри основной движущейся цели и анализа реактивности при неожиданном появлении дополнительной движущейся цели. Однообразный характер движения объекта позволяет быстро, в течение 1 ч вызывать состояние монотонии и снижение уровня бодрствования, аналогичное состоянию, возникающему у водителей при длительной езде на большие расстояния [8, 24], а также направленно изменять параметры эксперимента для исследования разнообразных координационных паттернов с различным характером взаимодействия между движениями глаз и рук [7, 22, 24, 27, 28].

## МЕТОДИКА

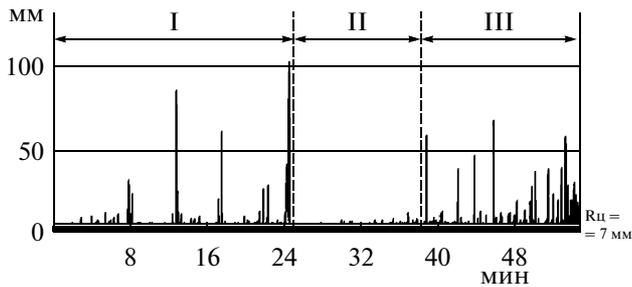
Было проведено две серии экспериментов, в которых испытуемый должен был курсором

“мыши” сопровождать цели, движущиеся по экрану монитора.

**Первая серия.** В первой серии отрабатывались параметры эксперимента с целью получения у испытуемого состояния монотонии. Длительное однообразное движение по круговой орбите при выполнении первой серии должно было вызывать у испытуемого развитие состояния монотонии и снижение уровня бодрствования. Подбирались: траектория движения цели, ее скорость, размеры, а также длительность эксперимента, чтобы в течение 1 ч наблюдать ошибки в выполнении теста, вызываемые снижением уровня бодрствования. Были выбраны следующие характеристики: круговая орбита, по которой перемещалась цель (Ц1), имела радиус 40 мм, сама цель — небольшое круглое пятно, имела диаметр 14 мм и двигалась с небольшой скоростью — 17 град./с. За 20 с цель описывала полную круговую траекторию.

Продолжительность эксперимента составляла не более 60 мин, чему соответствовало около 180 повторных проходов цели на круговой траектории. Испытуемый получал инструкцию: смотреть на цель и курсор и удерживать курсор “мыши” внутри круга-цели. Измерялось расстояние между координатами курсора “мыши” и координатами центра цели. Ошибкой считался выход курсора за пределы цели (рис. 1), когда расстояние между координатами курсора “мыши” и координатами центра цели становилось больше радиуса цели.

**Вторая серия.** Во второй серии к условиям первой серии добавлялось неожиданное появление дополнительной движущейся цели (Ц2), которое должно было тестировать нарушения реактивности испытуемого, вызываемой развитием состояния монотонии. На рис. 2 представлены траектории основной (Ц1) и дополнительной (Ц2) целей, взгляда и курсора мыши. Дополнительная цель (“сателлит”), представляла собой круглое пятно диаметром 14 мм, которое вращалось по круговой орбите с радиусом 70 мм вокруг основной движущейся цели с угловой скоростью 6 град./с. Большую часть времени “сателлит” был невидимым и случайным образом с интервалом от 15 до 40 с (1 раз за 0.75–2 круга) становился видимым максимум на 3 с. Испытуемый получал инструкцию: в течение этого времени как можно быстрее коснуться “сателлита” курсором “мыши” и нажать на кнопку “мыши”. При успешном выполнении задания (нажатии кнопки при контакте курсора с целью) цель исчезала, и



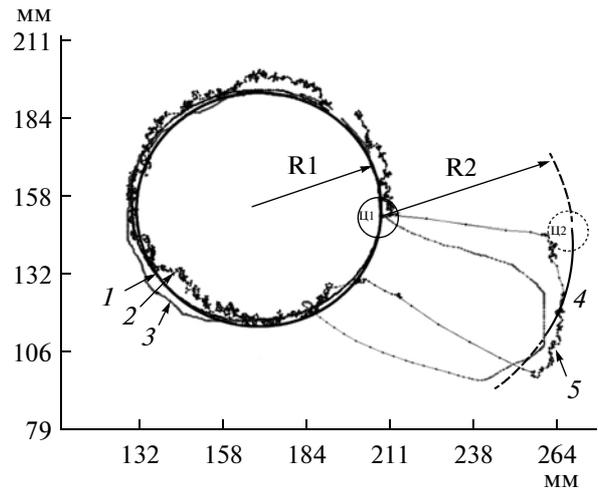
**Рис. 1.** Динамика развития ошибок в выполнении теста, вызываемых снижением уровня бодрствования (первая серия, испытуемый М.). По оси ординат – расстояние между координатами центра цели и курсором “мыши”, мм, по оси абсцисс – время, мин. Светлая горизонтальная линия – радиус цели ( $R_{ц} = 7 \text{ мм}$ ). Ошибкой считался выход курсора за пределы цели. Вертикальными линиями выделены три участка с разным характером выполнения теста: I – период обучения, II – стабилизация показателей, III – увеличение вариабельности, связанное со снижением уровня бодрствования. Объяснение в тексте.

**Fig. 1.** Time sequence of the errors caused by decrease in the level of wakefulness (the first series, subject M.). Ordinate: distance between coordinates of target center and mouse cursor (mm), abscissa – time (s). Light horizontal line – target radius ( $R_{ц} = 7 \text{ мм}$ ). Cursor going out of the cursor from the boundary of the target is considered as an error. I, II, III – areas with different dynamics of the parameters. I – period of learning, II – stabilization of parameters, III – increase of variability during decrease of wakefulness level.

испытуемый должен был вернуть курсор к сопровождению основной цели. Соответственно в этом случае время предъявления “сателлита” оказывалось менее 3 с.

Движения глаз регистрировались системой видеотрекинга для бесконтактной видеорегистрации движения глаз (Eyegaze Development System, “LC Technologies”, USA), основанной на отражении инфракрасного света от роговицы глаза и позволяющей определять координаты направления взора с временным разрешением 120 Гц. Траектория движения курсора “мыши” оцифровывалась также с разрешением 120 Гц.

Для оценки уровня бодрствования регистрировались: электроэнцефалограмма в отведениях C3 и C4, электроокулограмма (ЭОГ) и синхронное видеоизображение испытуемого. Для монополярной регистрации ЭЭГ и ЭОГ использовались чашечковые золоченые



**Рис. 2.** Изменения траектории взгляда и курсора “мыши” при появлении дополнительной цели (вторая серия). По осям ординат, абсцисс – координаты экрана монитора, измеряемые от нижнего левого угла, мм, Ц1 – основная цель (кружок диаметром 14 мм, сплошная линия,  $\varnothing 14 \text{ мм}$ ), 1 – круговая траектория движения основной цели (радиус окружности  $R1 = 40 \text{ мм}$ ), 2 – траектория движения взгляда (саккада), 3 – траектория движения курсора мыши. Ц2 – дополнительная цель (кружок диаметром 14 мм, пунктирная линия  $\varnothing 14 \text{ мм}$ ), 4 – круговая траектория дополнительной цели (радиусом  $R2 = 70 \text{ мм}$ ), по которой она вращается вокруг основной цели, 5 (стрелка) – момент нажатия на кнопку “мыши” при контакте курсора “мыши” с дополнительной целью. Сплошная линия – видимая часть траектории дополнительной цели от момента ее появления, пунктирная – невидимая часть траектории до появления и после ее исчезновения. Видно, что появление дополнительной цели вначале вызвало быстрое перемещение глаза (саккаду) в сторону цели, а затем – более медленное движение курсора мыши.

**Fig. 2.** Trajectory changes in reply to occurrence of secondary target (the second series). Ordinate and abscissa – monitor screen coordinates measured from down left angle (mm). Ц1 – the main target (circle, diameter = 14 mm), 1 – circular trajectory of the main target movement (Ц1, radius = 40 mm), 2 – trajectory of gaze (saccadic movement), 3 – trajectory of mouse cursor. Ц2 – secondary target (circle, diameter = 14 mm), 4 – circular trajectory of the secondary target (Ц2, radiuses = 70 mm) rotating around the main target, 5 (arrow) – the moment of button pressing when the mouse cursor contacts with the secondary target. Continuous line – visible part of trajectory from the moment of secondary target appearance dotted line – invisible part of the trajectory. It is obvious that the secondary target appearance at first evoked the rapid eye movement (saccade) and then – more slow movement of mouse cursor to the target.

электроды (фирмы “Grass”, USA), фиксируемые на коже головы испытуемого клеящейся электродной пастой (фирмы “Grass”). Для регистрации этих показателей использовали многоканальный компьютерный полиграф “ПолиСон” производства фирмы НЕЙРОКОМ, Россия.

Работа выполнена на здоровых испытуемых обоего пола, возраст 21–30 лет, без депривации сна. В первой серии опытов участвовали 10, а во второй – 14 человек. Эксперименты проводились во второй половине дня (от 13:00 до 18:00). Все испытуемые имели опыт пользования компьютером не менее 3 лет и уверенно владели компьютерной “мышью”. Испытуемые были практически здоровы и не имели жалоб на проблемы со сном. Они удобно сидели в кресле со специальной подставкой для шеи, снижающей возможные движения головы, в магнитоэкранированной и звукоизолированной камере, с небольшой световой подсветкой (18 лк). На расстоянии 64 см от глаз испытуемого находился монитор установки для регистрации движения глаз, на котором предъявлялась движущаяся цель. Кисть рабочей руки испытуемого находилась на подставке ниже монитора и манипулировала беспроводной компьютерной “мышью”. Испытуемые были информированы о процедуре эксперимента и подписывали письменное согласие на участие в нем.

Программа предъявления стимулов и регистрации движения “мышь” является собственной разработкой коллектива. Эта программа позволяла автоматически определять расстояние между курсором мыши и центром основной цели. Графическое представление и визуальный анализ траекторий движений взгляда, курсора “мышь” и нажатия клавиши “мышь” проводились с помощью программ Matlab и Excel. Для подсчета средних значений измеряемых показателей и достоверности их различий, а также для определения корреляции между движениями взгляда и руки использовался пакет программ Statistica 6.0.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

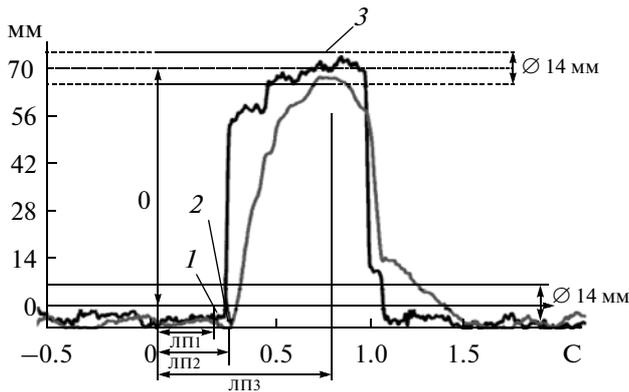
В первой серии опытов монотонный однообразный характер деятельности быстро (через 25–40 мин) вызывал развитие дремотного состояния и появление ошибок, которыми считался выход курсора за пределы цели. На рис. 1 светлой горизонтальной линией ( $R_c = 7$  мм) обозначен радиус цели, выход курсора за преде-

лы которого считался ошибкой ( $R_{ц.м} > R_c$ ), а вертикальными линиями выделены три участка с разным характером выполнения теста. В начале эксперимента, на участке I возникновение ошибок связано с процедурой обучения испытуемого, на участке II у обученного испытуемого наблюдалось значительное снижение величины и количества этих ошибок, а затем к концу эксперимента на участке III, через 48–50 мин после его начала, ошибки появлялись опять (рис. 1, III). Ошибки, возникающие к концу эксперимента, связаны со снижением уровня бодрствования и появлением эпизодов “микросна”, что идентифицировалось по появлению на ЭЭГ дремотных паттернов и по визуальному анализу видеоизображения испытуемого.

Как известно, при прослеживании цели, движущейся с небольшой скоростью, типичной формой движений глаз являются медленные прослеживающие движения глаз. В первой серии наблюдались преимущественно прослеживающие движения глаз, и только после ошибок иногда возникали компенсационные саккады, необходимые для восстановления направления взгляда на движущуюся цель. В нашей работе не наблюдалось достоверной корреляции между движениями взгляда и курсора “мышь”, что указывает на низкую координацию между движениями глаз и руки при прослеживании цели по известному маршруту.

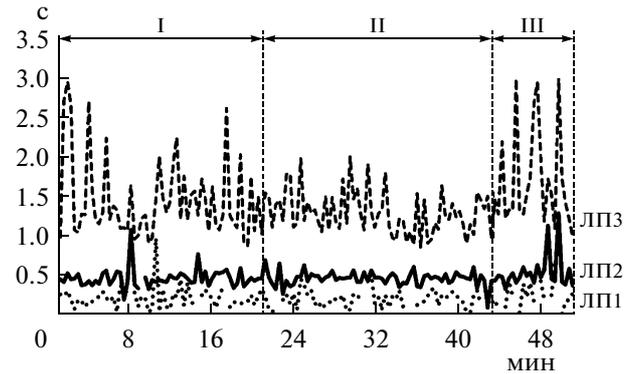
Во второй серии опытов для тестирования изменений функционального состояния испытуемого использовали неожиданное появление дополнительного стимула – “сателлита”, которое вызывало быстрое саккадическое движение глаз. Измерялись латентные периоды саккад, движения руки и нажатия клавиши “мышь” от момента появления сателлита.

На рис. 2 схематически представлен типичный пример эксперимента: круговая траектория движения основной цели (круглое пятно в правой части круга – Ц1) обозначена толстой темной линией (1), траектория движения взгляда состоит из отдельных точек (2), траектория движения курсора “мышь” обозначена непрерывной светло-серой линией (3). Место появления дополнительного цели обозначено пунктирным кружком (Ц2), а видимая часть его круговой траектории представлена отрезком окружности, выделенной непрерывной линией (4). Видно, что появление “сателлита” вначале вызвало быстрое перемещение взгляда (практически перпендикулярная к касательной к первой окружности линия пути взора от Ц1 до



**Рис. 3.** Схема определения латентных периодов взора, курсора мыши и нажатия клавиши “мыши” при появлении дополнительной цели. Развертка во времени траекторий взора и курсора “мыши”, представленных на рис. 2. По оси ординат – расстояние на мониторе (мм) между центром основной цели и координатами взгляда (1) и курсора “мыши” (2); 3 – стрелка, момент нажатия на кнопку “мыши” при контакте курсора “мыши” с дополнительной целью. Внизу “0” на оси ординат – центр траектории основной цели, вверх “70” на оси ординат – центр траектории дополнительной цели. Внизу (Ø 14 мм) и вверх (Ø 14 мм) – две тонкие горизонтальные линии отмечают границы диаметров основной и дополнительной целей. На этих двух линиях сплошная линия – видимая часть траектории от момента появления дополнительной цели, пунктирная – невидимая часть траектории до появления и после исчезновения дополнительной цели (см. рис. 2). По оси абсцисс – время, с. 0 на оси абсцисс отмечен вертикальной стрелкой – момент появления дополнительной цели. Стрелками обозначены моменты времени, выбранные для определения латентных периодов: 1 – начала движения взгляда (ЛП1), 2 – начала движения мыши (ЛП2), 3 – момент касания курсором дополнительной цели (ЛП3).

**Fig. 3.** The scheme of reaction time measuring (latent period – ЛП): saccadic movement, mouse cursor and mouse button pressing in reply to secondary target appearance. Time development of the gaze and mouse cursor trajectories see on fig. 2. Down Line “0” – center main of the target trajectory (Ø 14 mm). UP Line “70” – center secondary target trajectory (Ø 14 mm). Two thin horizontal lines – mark diameters of the main and secondary targets. Continuous line – visible part of trajectory, dashed line – invisible part (see fig. 2). On abscissa time (s). Arrow the moments chosen for determination latent of periods: 0 – the moment of secondary appearance target, 1 – beginning of the saccadic eye movement (ЛП1), 2 – beginning of mouse movement (ЛП2), 3 – the moment of button pressing when the mouse cursor contact with the secondary target (ЛП3).

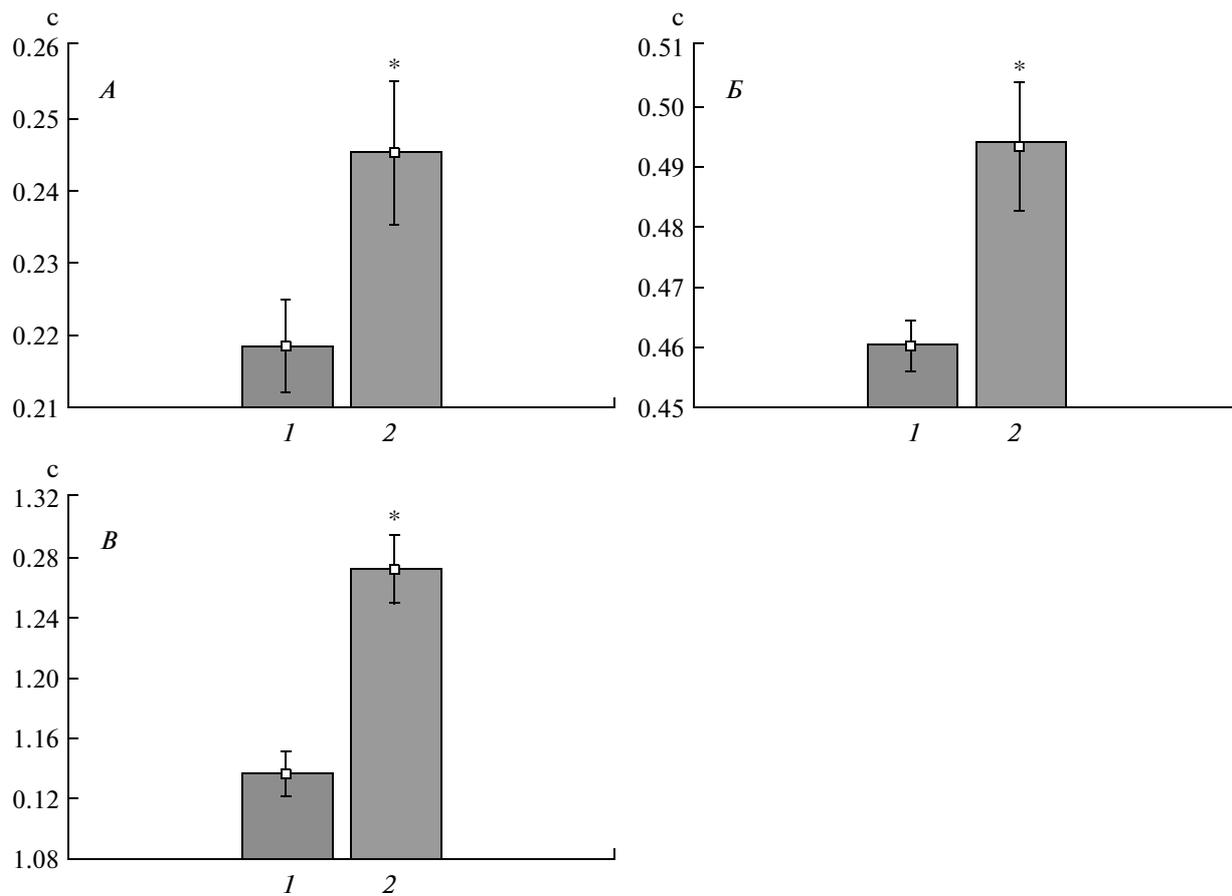


**Рис. 4.** Динамика латентных периодов взора (ЛП1) курсора мыши (ЛП2) и нажатия клавиши “мыши” (ЛП3) при появлении дополнительной цели. Вертикальными линиями выделены три участка с разным характером выполнения теста: I – период обучения, большая вариабельность ЛП исследуемых показателей, II – стабилизация показателей ЛП, III – увеличение вариабельности показателей ЛП, связанных со снижением уровня бодрствования. По оси ординат – величина ЛП, с, по оси абсцисс – время от начала эксперимента, мин.

**Fig. 4.** Time sequence of the saccade latency (ЛП1), latent period of the mouse cursor (ЛП2), and latent period of pressing the button (ЛП3) at the secondary target appearance. I, II, III – areas with different dynamics of analyzing parameters. I – period of learning large variability of the parameters, II – stabilization of parameters, III – parameters increase of variability while decrease of wakefulness level. Ordinate – the value of latent period (s), abscissa – time from the experiment beginning (min).

Ц2, состоящая из четырех промежуточных точек-отсчетов) и более медленное перемещение курсора “мыши” в сторону “сателлита” (более плавная и изогнутая линия движения “мыши”). Момент нажатия на кнопку “мыши” при касании курсором движущегося “сателлита” указан стрелкой (5). Этот момент на траектории движения “сателлита” выделен сменой сплошной линии на пунктирную. Видно, что после исчезновения сателлита траектории взгляда и курсора вернулись к движущейся основной цели.

Основными параметрами анализа являлись латентные периоды реакций движения взора, “мыши” и нажатия на клавишу (рис. 3). Латентный период взора и движения курсора измерялся относительно момента появления сателлита, а сам момент начала их движения определялся визуально. Аналогично измерялся латентный период нажатия клавиши “мыши”.



**Рис. 5.** Средние значения латентных периодов: *A* – взора (ЛП1), *Б* – курсора “мыши” (ЛП2) и *В* – нажатия клавиши “мыши” (ЛП3) для 6 испытуемых (см. рис. 4). По оси ординат – значения латентных периодов, с, по оси абсцисс: 1 – средние значения показателей для участка II на рис. 4, со стабилизацией ЛП показателей, 2 – средние значения показателей для участка III на рис. 4, со снижением уровня бодрствования. На столбиках указаны значения ошибки среднего. \* – различия достоверны (t-критерий Стьюдента,  $p < 0.05$ ).

**Fig. 5.** The average means of *A* – saccade latency (ЛП1), *Б* – the latent periods of mouse cursor (ЛП2), *В* – the latent periods mouse pressure button (ЛП3) for 6 subject (see Fig. 4). Ordinate: columns – value of latent periods (s.). Abscissa: 1 – stabilization period (area II on fig 4), 2 – period of the decrease of the level of wakefulness, (area III on fig. 4). On the columns are shown the means of errors. \* – differences are significant ( $p < 0.05$ ).

На рис. 4 можно видеть динамику изменений латентных периодов курсора взора и мыши, сходную с описанной выше, в первой серии (рис. 1).

Анализ латентных периодов в фоне и во время состояний со сниженным уровнем бодрствования показал достоверный рост латентных периодов во время состояний со сниженным уровнем бодрствования (рис. 5). Латентный период взора возрастал от  $0.218 \pm 0.0057$  с до  $0.245 \pm 0.0087$  с, латентный период движения курсора от  $0.460 \pm 0.0032$  с до  $0.494 \pm 0.0124$  с, а латентный период нажатия кнопки “мыши” увеличивался от  $1.137 \pm 0.0214$  с до  $1.267 \pm$

$\pm 0.0321$  с. Для определения достоверности различий был использован t-критерий Стьюдента.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как уже было сказано выше, в первой серии опытов монотонный характер деятельности быстро (через 25–40 мин) вызывал развитие дремотного состояния и появление ошибок – выхода курсора за пределы цели. На рис. 1 можно выделить три участка I, II, III, характеризуемые количеством ошибок, – выходов курсора за пределы цели. Первый участок, обозначенный I, мы связываем с периодом обучения, когда ошибки возникали из-за отсутствия навыка

у испытуемого. Это подтверждает отсутствие внешних и энцефалографических признаков развития состояний со сниженным уровнем бодрствования. На участке II испытуемый хорошо выполняет задание, что видно по отсутствию ошибок. На участке III видно опять появление ошибок, но уже связанных со снижением уровня бодрствования и появлением эпизодов “микросна”, идентифицированных по ЭЭГ и по визуальному анализу видеоизображения испытуемого.

Длительность и характер этих трех участков может служить индивидуальной характеристикой зрительно-моторной координации испытуемых. Длительность и величина отклонений первого и второго участков характеризовали обучаемость и “аккуратность” испытуемого. А время появления ошибок на участке III может служить мерой как моноустойчивости испытуемого, так и уровня его сонливости.

У половины испытуемых наблюдались довольно грубые ошибки, вызываемые кратковременными эпизодами с закрыванием глаз длительностью 2–5 с (“микросон”). Перед такими эпизодами “микросна” на ЭЭГ довольно часто наблюдалось возникновение альфа-веретен и тета/дельта-волн, характерных для начальной стадии дремоты (“дремотные паттерны ЭЭГ”). Кратковременные закрывания глаз обычно сопровождалось появлением или усилением ритмики в альфа-диапазоне ЭЭГ. В момент эпизодов “микросна” наблюдали, как остановку движения курсора “мышь”, так и продолжение движения курсора по траектории, близкой к касательной. У испытуемых с возникновением эпизодов “микросна” наблюдалось от 3 до 12 таких эпизодов в течение 60-минутного эксперимента.

Во второй серии опытов анализируемыми параметрами являлись латентные периоды реакций движения взора, “мышь” и нажатия на клавишу. Мы наблюдали изменения латентных периодов реакций в течение опыта (рис. 4). Изменения параметров реакций по своей структуре сходны с ошибками выхода на рис. 1, а именно, динамика изменений латентных периодов курсора взора и “мышь” сходна. Вначале происходят значительные колебания латентных периодов движения “мышь” и попадания, что связано с эффектом обучения. Вариабельность колебания латентных периодов взора было значительно меньше. После этого колебания латентных периодов уменьшались, и начинался более стабильный участок. Ближе к концу

опыта снова появлялся участок со значительными колебаниями латентных периодов исследуемых показателей, что связано со снижением уровня бодрствования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ временных характеристик медленных прослеживающих и быстрых саккадических движений глаз, движения курсора “мышь” и нажатия клавиши “мышь” показал их высокую чувствительность к снижению работоспособности оператора, вызываемой снижением уровня бодрствования. В настоящей работе использовался визуальный способ определения латентных периодов исследуемых показателей. Сейчас нами разрабатываются алгоритмы для компьютерного анализа временных характеристик медленных прослеживающих и быстрых саккадических движений глаз, которые позволят значительно ускорить количественный анализ зрительно-моторной координации. Дальнейшее развитие этого подхода будет способствовать разработке бесконтактного метода экспресс-диагностики критических уровней сонливости и определения профессиональных характеристик человека-оператора, требующих высокого уровня зрительно-моторной координации.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского гуманитарного научного фонда (проект № 08-06-00598а), Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 09-06-12040офи-м) и фонда Президиума РАН (проект “Фундаментальные науки – медицине”).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Величковский Б.М.* Успехи когнитивных наук: технологии, внимательные к вниманию человека. В мире науки. 2003 (12): 87–93.
2. *Дементюенко В.В., Дорохов В.Б., Герус С.В., Марков А.Г., Шахнарович В.М.* Эффективность систем мониторинга водителя. Журн. техн. физики. 2006. 77(6): 103–108.
3. *Дементюенко В.В., Дорохов В.Б., Герус С.В., Коренева Л.Г., Марков А.Г., Шахнарович В.М.* Биоматематическая модель засыпания человека-оператора. Физиология человека. 2008. 34(5): 63–72.
4. *Дорохов В.Б.* Анализ психофизиологических механизмов нарушения деятельности при дремотных изменениях сознания. Вестн. РГНФ. 2003(4): 137–144.
5. *Дорохов В.Б., Украинцева Ю.В., Арсеньев Г.Н., Лаврова Т.П.* Движения глаз и утомление. Материалы Второй международной конференции по когнитивной наукею Москва, 255–256.

6. Ярбус А.Л. Роль движений глаз в процессе зрения. М.: Наука, 1965. 166 с.
7. Baulk S.D., Biggs S.N., Reid K.J., van den Heuvel C.J., Dawson D. Chasing the silver bullet: measuring driver fatigue using simple and complex tasks. *Accid. Anal. Prev.* 2008. 40(1): 396–402.
8. Chattington M., Wilson M., Ashford D., Marple-Horvat D.E. Eye-steering coordination in natural driving. *Exp. Brain. Res.* 2007. 180(1): 1–14.
9. De Brouwer S., Missal M., Barnes G., Lefevre P. Quantitative analysis of catch-up saccades during sustained pursuit. *J. Neurophysiol.* 2002(87): 1772–1780.
10. De Xivry J.-J.O., Bennett S.J., Lefèvre P., Barnes G.R. Evidence for synergy between saccades and smooth pursuit during transient target disappearance. *J. Neurophysiol.* 2006(95): 418–427.
11. De Xivry J.-J.O., Lefevre P. Saccades and pursuit: two outcomes of a single sensorimotor process. *J. Physiol.* 2007(584): 11–23.
12. Dorokhov V.B., Arsenyev G.N., Tkachenko O.N., Zakharchenko D.V., Dementienko V.V. Eye-hand coordination errors during monotonous activity. Abstracts of the 15th European Conference on Eye Movements. University of Southampton. UK. 2009. 159.
13. Dorokhov V.B., Arsenyev G.N., Zakharchenko D.V., Ukraintseva Yu.V., Lavrova T.P., Dementienko V.V., Kadin I.L., Markov A.G., Shakhnarovich V.M. Eye-hand coordination: Performance errors and vigilance level. *Int. J. Psychophysiol.* 2008. 69(3): 266.
14. Ferrara S.D., Zancaner S., Giorgetti R. Low blood alcohol concentrations and driving impairment. A review of experimental studies and international legislation. *Int. J. Legal. Med.* 1994. 106(4): 169–177.
15. Field D.T., Wilkie R.M., Wann J.P. The dynamics of reciprocal aiming with a steering wheel. *Exp. Brain. Res.* 2008. 188(1): 141–146.
16. Land M.F., Lee D.N. Where we look when we steer. *Nature.* 1994 (369): 742–744.
17. Land M.F., Lee N. Does gaze influence steering around a bend? *J. Vis.* 2008. 23: 8(4): 1–13.
18. Lazzari S., Vercher J.L., Buizza A. Manuo-ocular coordination in target tracking. I. A model simulating human performance. *Biol. Cybern.* 1997. 77(4): 257–266.
19. Marconi B., Genovesio A., Battaglia-Mayer A., Ferraina S., Squatrito S., Molinari M., Lacquaniti F., Caminiti R. Eye-hand coordination during reaching. I. Anatomical relationships between parietal and frontal cortex. *Cereb. Cortex.* 2001. 11(6): 513–516.
20. Marple-Horvat D.E., Cooper H.L., Gilbey S.L., Watson J.C., Mehta N., Kaur-Mann D., Wilson M., Keil D. Alcohol badly affects eye movements linked to steering, providing for automatic in-car detection of drink driving. *Neuropsychopharmacology.* 2008. 33(4): 849–858.
21. Miall R.C., Reckess G.Z. The cerebellum and the timing of coordinated eye and hand tracking. *Brain Cogn.* 2002. 48(1): 212–226.
22. Neggers S.F.W., Bekkering H. Coordinated control of eye and hand movements in dynamic reaching. *Hum. Mov. Sci.* 2002. 21: 349–376.
23. Philip P., Taillard J., Klein E., Sagaspe P., Charles A., Davies W.L., Guilleminault C., Bioulac B. Effect of fatigue on performance measured by a driving simulator in automobile drivers. *J. Psychosom. Res.* 2003. 55(3): 197–200.
24. Robertshaw K.D., Wilkie R.M. Neural systems in the visual control of steering. *J. Neurosci.* 2007. 27(30): 8002–8010.
25. Thiffault P., Bergeron J. Monotony of road environment and driver fatigue: a simulator study. *Accid. Anal. Prev.* 2003. 35(3): 381–391.
26. Whitlock A. Driver Vigilance Devices: Systems Review. Surrey, United Kingdom: Quintec Associates Limited. 2002. Retrieved from <http://www.rsb.co.uk/pdf/reports/research>.
27. Whitney D., Goodale M.A. Visual motion due to eye movements helps guide the hand. *Exp. Brain Res.* 2005. 162(3): 394–400.
28. Wilmot K., Wann J.P., Brown J.H. How active gaze informs the hand in sequential pointing movements. *Exp. Brain Res.* 2006. 175(4): 654–666.