



ОКУЛОГРАФИЧЕСКИЕ МАРКЕРЫ АБНОРМАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ОПЕРАТОРА НА МОДЕЛЯХ ПЛАВНОГО ПРОСЛЕЖИВАНИЯ ЦЕЛИ И ДИСКРЕТНОГО ПОЯВЛЕНИЯ/ИСЧЕЗНОВЕНИЯ СТИМУЛА

ЗАХАРЧЕНКО Д.В.*, *Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва, Россия,*
e-mail: dz-ihna@mail.ru

ДОРОХОВ В.Б.**, *Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва, Россия,*
e-mail: vbdorokhov@mail.ru

В статье рассматривается возможность использования параметров окуломоторных реакций в качестве маркеров, пригодных для автоматической оценки, распознавания и непрерывного мониторинга функционального состояния оператора (водителя, диспетчера и т. д.). На моделях плавного прослеживания цели и дискретного появления/исчезновения стимула произведена экспериментальная оценка возможности распознавания абнормальных состояний оператора и вызываемых ими нарушений деятельности. Проанализированы и описаны изменения зрительно-моторных реакций под действием алкоголя (1 грамм 96% алкоголя на килограмм веса тела испытуемого): изменения латентного периода макросаккад и моторной реакции, изменения средней мгновенной скорости макросаккад, изменения времени реакции. Проанализированы изменения плавности прослеживания цели, вызванные алкогольным опьянением. Выделены окуломоторные реакции, пригодные в качестве маркеров для диагностики изменения функционального состояния оператора и диагностики нарушений операторской деятельности.

Ключевые слова: видеоокулография, траектория взгляда, целевой объект, саккада, фиксация, алкоголь, оператор, функциональные состояния, зрительное восприятие, плавное прослеживание.

Введение

На протяжении последних полутора десятилетий исследования окуломоторных реакций в процессе деятельности являются одним из наиболее востребованных на-

Для цитаты:

Захарченко Д.В., Дорохов В.Б. Окулографические маркеры абнормальных состояний оператора на моделях плавного прослеживания цели и дискретного появления/исчезновения стимула // Экспериментальная психология. 2016. Т. 9. № 1. С. 53–68. doi:10.17759/exppsy.2016090105

* *Захарченко Д.В.* Кандидат биологических наук, научный сотрудник, лаборатория нейробиологии сна и бодрствования, Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН. E-mail: dz-ihna@mail.ru

** *Дорохов В.Б.* Доктор биологических наук, заведующий лабораторией нейробиологии сна и бодрствования, Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН. E-mail: vbdorokhov@mail.ru



правлений с точки зрения практического применения (Hartley et al., 2000; Heitmann et al., 2001; Edwards et al., 2007; Dorrian et al., 2008; Kerick et al., 2013). Для диагностики абнормальных состояний оператора различные исследователи предлагают использовать изменение латентных периодов макросаккад и доли мультисаккад (Litvinova et al., 2011), изменение параметров скоординированности между взглядом и движением рук (Marple-Horvat et al., 2008; Mrotek et al., 2007), моргания и PERCLOS (Dinges et al., 1998; Stern et al., 1994). Однако, несмотря на большое число исследований и полученных результатов, окуломоторные маркеры абнормальных состояний оператора, пригодные для автоматической аппаратурной диагностики состояния оператора в режиме реального времени, так и не были выделены вплоть до настоящего времени (Wright et al., 2007; Kerick et al., 2013).

Идея нашего исследования заключалась в том, чтобы на модели алкогольного опьянения сравнить параметры окуломоторных реакций оператора в нормальном состоянии и в состоянии, когда оператор заведомо неадекватен и деятельность его нарушена. На основании выявленных изменений мы планировали выделить окуломоторные реакции, потенциально пригодные в качестве маркеров изменения функционального состояния и маркеров нарушения деятельности. Особенностью нашего исследования является измерение одних и тех же параметров окуломоторных реакций в условиях дискретного появления/исчезновения стимулов и в условиях плавного прослеживания цели. Указанный подход позволяет сопоставить результаты для этих двух моделей деятельности и таким образом оценить стабильность полученных окуломоторных маркеров и их потенциальную пригодность для применения на практике, поскольку высокая индивидуальная вариабельность окуломоторных реакций делает пригодными для практического применения далеко не все из них.

Вопрос о специфичности полученных маркеров не может быть решен в рамках одного исследования и останется открытым. Однако весьма вероятным представляется тот факт, что полученные окулографические маркеры будут иметь слабую специфичность и, соответственно, окажутся эффективными не только для детекции алкогольного опьянения, но и для диагностики любых других отклонений от нормы, вызванных любыми известными или неизвестными факторами.

Материалы и методы

В исследовании добровольно приняли участие 22 испытуемых мужского пола в возрасте от 20 до 36 лет. Все испытуемые были физически здоровы и не имели проблем с алкоголем. Первый этап отбора проводился через Интернет и включал в себя информирование о процедуре исследования и первичный инструктаж (нормально выспаться, не употреблять алкоголь, кофе и фармакологические препараты в день эксперимента и накануне, пообедать за 2 часа до начала тестов). Участие в исследовании оплачивалось. Таким образом, все согласившиеся на эксперимент имели необходимый опыт работы с компьютером и мышью, а также мотивацию, достаточную для выполнения тестовых заданий. Второй этап отбора проводился непосредственно в день эксперимента и включал в себя ознакомление с тестовыми заданиями и пробную запись видеоокулограммы (испытуемый сидел в экспериментальном кресле и выполнял сокращенные версии тестовых заданий). Экспериментатор в это время проверял качество записи и калибровал аппаратуру).



Для создания экспериментальной модели алкогольного опьянения испытуемые принимали алкоголь в количестве 1 грамм 96% алкоголя на 1 килограмм веса тела, при этом количество 96% медицинского спирта пересчитывалось на 40% водку. Количество алкоголя в выдохе оценивалось с помощью алкотестера AL-7000 с точностью $\pm 15\%$ от полученного значения (перед началом, в середине и в конце экспериментальной серии). Учитывалась также динамика усвоения алкоголя: после приема алкоголя испытуемый в течение часа общался с экспериментатором на отвлеченные темы, и только потом начинался тест.

Траектория перемещения взгляда регистрировалась при помощи системы бесконтактной видеорегистрации движений глаз (Eyegaze Analyzing System), использующей принцип отражения инфракрасного света от роговицы глаза (далее – «видеоокулографа») с программным обеспечением NYAN 2® компании Interactive Minds. Пространственное разрешение системы – $0,2^\circ$. Запись велась в бинокулярном режиме попеременно двумя камерами, суммарная частота опроса – 120 Гц; расстояние до экрана – 60 см, экранное разрешение – 1280×1024 пикселей, размеры пикселя – 0,265 мм (в данном эксперименте угловое смещение экранного объекта на один пиксел примерно соответствует смещению на $0,0246^\circ$ относительно глаза испытуемого). Голова испытуемого фиксировалась сзади подголовником кресла.

Помимо окуломоторных реакций, с помощью специально разработанных программ регистрировалась траектория движения курсора мыши по экрану, все нажатия на клавиши мыши и связанные с ними события на экране (появление, перемещение и исчезновение тестовых стимулов). Дискретность регистрации – 8 мс (125 Гц).

Для моделирования различных аспектов операторской деятельности нами были разработаны и реализованы в виде программ на языке Delphi три психомоторных теста («Статика», «Динамика», «Динамика и дополнительный стимул»). Эти тесты позволяют оценивать реакцию как на статически появляющиеся и исчезающие стимулы, так и на движущиеся объекты (цель). Тесты предъявлялись в затемненной камере на жидкокристаллическом мониторе Samsung с диагональю 17 дюймов (340×270 мм, разрешение 1280×1024 пикселей) и в инструкции для испытуемого были заявлены как «стрельба по целям».

В тесте «Статика» экран условно делили на 20 секторов в виде сетки (5 по горизонтали, 4 по вертикали); каждый сектор имел свой номер (рис. 1-1), границы и номер секторов на экран не выводились. В начале опыта в центре одного из секторов появлялась цель в форме круга диаметром 5 мм ($0,46^\circ$). Испытуемый получал инструкцию максимально быстро навести на него курсор и щелкнуть мышью. При попадании цель исчезала и одновременно появлялась в центре другого сектора. Последовательность секторов была сформирована с помощью генератора случайных чисел и являлась общей для всех испытуемых во всех экспериментах. В течение опыта предъявлялось 120 стимулов-целей; испытуемый должен был поразить их все за максимально короткое время. Для всех испытуемых во всех опытах последовательность секторов была одинаковой, координаты всех целей известны, траектория движения курсора мыши и все щелчки записывались в файл данных. Единичной пробой считалось предъявление одного стимула (т. е. все действия испытуемого с момента появления цели и до щелчка по цели мышью).

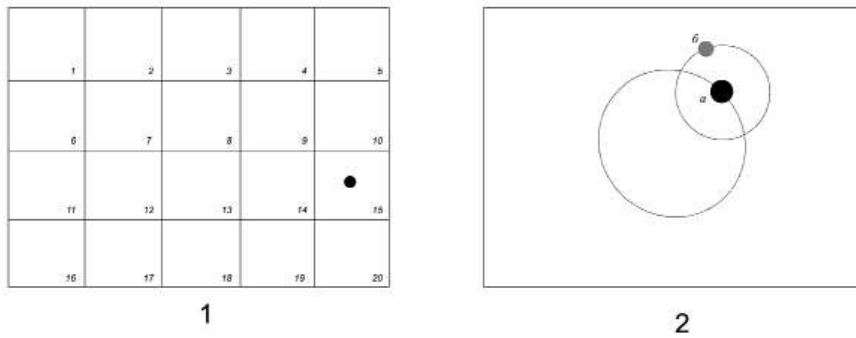


Рис. 1. Тесты «статика», «динамика», «динамика и дополнительный стимул»:

1 – тест «статика»: разбивка экрана на секторы, стимул. При тестировании сетка и номера секторов не отображаются;

2 – тесты «динамика», «динамика и дополнительный стимул»: *a* – основная цель, *b* – дополнительная цель. Обе цели движутся по часовой стрелке. При тестировании траектории не отображаются

В тесте «Динамика и дополнительный стимул» основная цель (зеленый круг диаметром 12 мм ($1,1^\circ$)) двигалась по круговой траектории диаметром 75 мм ($6,96^\circ$) с угловой скоростью 28 градусов в секунду относительно центра экрана (рис. 1-2). Один раз за полный оборот с внешней стороны траектории цели появлялась дополнительная цель – красный круг диаметром 12 мм ($1,1^\circ$). Дополнительная цель начинала двигаться по круговой орбите вокруг основной цели с угловой скоростью 29 градусов в секунду. Радиус орбиты дополнительной цели – 60 мм ($5,57^\circ$). Испытуемый получал инструкцию вести курсором мыши основную цель, стараясь не выходить за ее пределы; при появлении дополнительной цели он должен был быстро навести курсор на дополнительную цель и щелкнуть мышью. В случае попадания дополнительная цель исчезала, а испытуемый должен был быстро вернуть курсор на основную цель и вести ее дальше. Всего за тест предъявлялось порядка 70 дополнительных целей, паузы между предъявлениями варьировались в случайном порядке.

Тест «Динамика» полностью аналогичен тесту «Динамика и дополнительный стимул», за исключением того, что при появлении дополнительной цели испытуемый получал инструкцию щелкнуть по основной цели (по той, которую вел); дополнительная цель здесь играла роль сигнала и исчезала после щелчка по основной цели. Также в тесте «Динамика» отличались размеры основной цели (ее диаметр составлял 8 мм ($0,74^\circ$)); это было сделано для того, чтобы сравнить динамику изменения моторных паттернов на разных образцах стимула. Всего за тест предъявлялось порядка 150–180 дополнительных целей, паузы между предъявлениями варьировались в случайном порядке.

Процедура исследования включала в себя две серии опытов: контрольную и тестовую (рис. 2). Сначала выполнялась контрольная серия: испытуемый садился в кресло, производилась калибровка аппаратуры, после чего последовательно выполнялось тестирование по методике «Статика» (около 3 минут) и сразу же, без паузы, – по методике «Динамика» (15 минут). Затем делался небольшой перерыв (7–10 минут), в течение которого испытуемый мог встать, размяться, дать отдых глазам (перерыв нужен для того, чтобы избежать монотонии и не дать развиваться утомлению). После перерыва опять производилась калибровка аппаратуры, после чего без паузы выполнялись тесты «Динамика и дополнительный стимул» (15 минут) и «Статика» (около 3 минут). На этом контрольная серия заканчивалась – ис-



Схема эксперимента

Контрольная серия (до приёма алкоголя)



Тестовая серия (через 55 минут после приёма алкоголя)

Доза алкоголя:
1 г/кг веса тела



Рис. 2. Схема эксперимента

пытуемый переходил в другое помещение, там принимал алкоголь и в течение часа общался с экспериментатором на отвлеченные темы (пауза между контрольной и тестовой серией необходима, во-первых, для усвоения алкоголя и, во-вторых, для нивелирования стимулирующего эффекта). Через час после приема алкоголя проводился контрольный замер количества алкоголя в выдохе и начиналась тестовая серия опытов – полностью аналогичная контрольной.

В ходе исследования математической обработке подвергались следующие показатели зрительно-моторных реакций:

- латентный период макросаккад;
- латентный период моторной реакции;
- время реакции (время попадания в цель в каждом из тестов);
- средняя скорость макросаккад;
- показатели плавности прослеживания цели взглядом.

Помимо штатного программного обеспечения видеоокулографа NYAN 2 ® компании Interactive Minds нами были разработаны и использовались программы предъявления для тестов «Статика», «Динамика», «Динамика и дополнительный стимул», регистрирующие данные в режиме реального времени.

Для обработки экспериментальных данных разрабатывалось специальное ПО с применением процедур и функций Matlab:

- программы синхронизации лог-файлов видеоокулографа и каждого из тестов;
- программы визуализации для всех тестов;
- программы детекции артефактов (к артефактам относили моргания, эпизоды, в течение которых глаза находятся вне поля зрения видеоокулографа, сбои в работе таймеров Windows, некоторые окулomotorные паттерны, специфические траектории саккад, а также ряд поведенческих стратегий испытуемого);



- программы полуавтоматического распознавания саккадических движений глаз;
- программы оценки скорости взгляда и курсора мыши;
- программы обработки параметров движения руки (время попадания в цель, латентный период первого движения и т. д.) по лог-файлам программ предъявления;
- программы обработки траекторий взгляда;
- программы статистической обработки данных.

Результаты исследований

Направленность и достоверность изменения параметров реакций¹.

В табл. 1 представлены направленность и достоверность изменения параметров зрительно-моторных реакций после приема алкоголя для всех испытуемых выборки.

В тесте «Статика» (7–10-й столбцы) латентный период макросаккады, латентный период моторной реакции (начала движения курсора мыши) и время попадания в цель с высокой достоверностью увеличиваются (соответственно, $p < 0,00001$; $p < 0,02$; $p < 0,004$). Средняя скорость макросаккад при уровне достоверности $p < 0,00001$ уменьшается в 19 случаях из 22. Это единственный параметр, который изменяется относительно стабильно и с высокой достоверностью почти у всех испытуемых выборки.

В тесте «Динамика и дополнительный стимул» (3–6-й столбцы) направленность и интенсивность изменений аналогичны полученным в тесте «Статика»: латентный период макросаккад, латентный период моторных реакций (начала движения курсора к цели) и время попадания в цель достоверно увеличиваются (соответственно, $p < 0,00003$; $p < 0,00004$; $p < 0,01$), а средняя скорость макросаккад, наоборот, с высокой достоверностью снижается ($p < 0,00074$).

В тесте «Динамика» статистическими методами оценивался только один показатель – время попадания в цель. После приема алкоголя время реакции (время попадания в цель) в этом тесте увеличивается, достоверность изменений при этом весьма высока ($p < 0,000015$).

Анализ плавности траектории прослеживания.

Для оценки плавности прослеживания цели взглядом анализировались траектории перемещения взгляда из теста «Динамика». Особенности траекторий прослеживания отчетливо видны при визуализации (рис. 3): в контрольном опыте (рис. 3-А) взгляд ведет цель относительно плавно; рывки и длительные фиксации практически отсутствуют; возможны небольшие отклонения от траектории цели (обычно не больше 1–1,5 угловых градусов). После приема алкоголя (рис. 3-Б) траектория перестает быть плавной: появляются длительные фиксации, рывки (в том числе перпендикулярно траектории цели), возвраты назад; возрастает количество саккад и быстрых дрейфов.

Для количественной оценки плавности траекторий взгляда использовался следующий алгоритм:

1. С помощью цифрового фильтра сглаживаем траекторию взгляда (удаляется высокочастотная составляющая свыше 0,2 Гц) и выполняем подгонку по фазе (удаляем фазовое смещение, возникающее в результате работы цифрового фильтра). В результате получаем сглаженную траекторию взгляда – аппроксимирующую кривую.

¹ В контексте данной работы нас интересовала только направленность и стабильность изменения окуломоторных реакций, потенциально пригодных для диагностики состояний в роли маркеров. Подробный статистический анализ изменения показателей окуломоторных реакций под действием алкоголя был сделан в отдельной статье: Захарченко Д. В., Дорохов В. Б. Изменение отдельных параметров зрительно-моторных реакций под действием алкоголя // Экспериментальная психология. 2012. Т. 5. № 2. С. 5–21.



Таблица 1
Направление и достоверность изменения параметров окулоmotorных и двигательных реакций после приема алкоголя

Номер испытуемого	Тест «Динамика»		Тест «Динамика и дополнительный стимул»				Тест «Статика»				
	ВР	ЛС	ЛМ	ВР	ЛС	ЛМ	ВР	ЛС	ЛМ	ВР	ЛС
1	0,007	0,000	0,000	0,009	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,007	0,000	0,001	0,168	0,009	0,009	0,009	0,001	0,394	0,393	0,000
3	0,011	0,000	0,000	0,010	0,422	0,422	0,001	0,001	0,533	0,000	0,000
4	0,088	0,044	0,006	0,814	0,001	0,001	0,001	0,000	0,007	0,000	0,000
5	0,006	0,502	0,557	0,687	0,091	0,091	0,002	0,000	0,000	0,000	0,313
6	0,126	0,001	0,001	0,044	0,288	0,288	0,000	0,000	0,295	0,587	0,213
7	0,226	0,229	0,009	0,001	0,013	0,013	0,000	0,000	0,203	0,015	0,000
8	0,852	0,006	0,000	0,019	0,006	0,006	0,000	0,000	0,005	0,466	0,007
9	0,012	0,004	0,011	0,795	0,408	0,408	0,000	0,579	0,008	0,055	0,000
10	0,005	0,219	0,853	0,717	0,008	0,008	0,003	0,003	0,714	0,091	0,000
11	0,108	0,533	0,861	0,878	0,484	0,484	0,337	0,337	0,027	0,040	0,359
12	0,000	0,000	0,000	0,000	0,395	0,395	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
13	0,000	0,177	0,011	0,071	0,005	0,005	0,682	0,682	0,874	0,069	0,000
14	0,000	0,000	0,000	0,638	0,096	0,096	0,000	0,000	0,009	0,005	0,000
15	0,000	0,015	0,000	0,000	0,706	0,706	0,052	0,052	0,244	0,011	0,002
16	0,105	0,000	0,000	0,313	0,372	0,372	0,000	0,000	0,000	0,066	0,000
17	0,292	0,184	0,337	0,434	0,556	0,556	0,001	0,001	0,801	0,322	0,000
18	0,505	0,064	0,439	0,762	0,977	0,977	0,321	0,321	0,977	0,486	0,000
19	0,000	0,513	0,054	0,008	0,026	0,026	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
20	0,000	0,221	0,008	0,647	0,104	0,104	0,000	0,000	0,003	0,092	0,000
21	0,000	0,000	0,000	0,330	0,615	0,615	0,001	0,001	0,672	0,739	0,047
22	0,000	0,011	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Вся выборка	0,000	0,000	0,000	0,010	0,001	0,001	0,000	0,000	0,020	0,004	0,000

Примечание. Цветом указано направление изменений для $p < 0,05$ (t-критерий Стьюдента, во всех тестах данные имеют нормальное распределение). Светло-серая заливка – показатель достоверно увеличивается, темно-серая – достоверно уменьшается, белая – изменения недостоверны. Числа в ячейках – уровень достоверности.

2. Вычисляем расстояние в пикселах между каждой точкой реальной (несглаженной) траектории взгляда и соответствующей ей точкой сглаженной траектории. Получаем последовательность отклонений для каждой точки траектории взгляда от аппроксимирующей кривой. Эта процедура, по сути, является процедурой удаления из данных повторяющегося тренда (круговой составляющей траектории взгляда, которая не влияет на плавность прослеживания).

3. Полученную последовательность отклонений используем для статистического анализа.

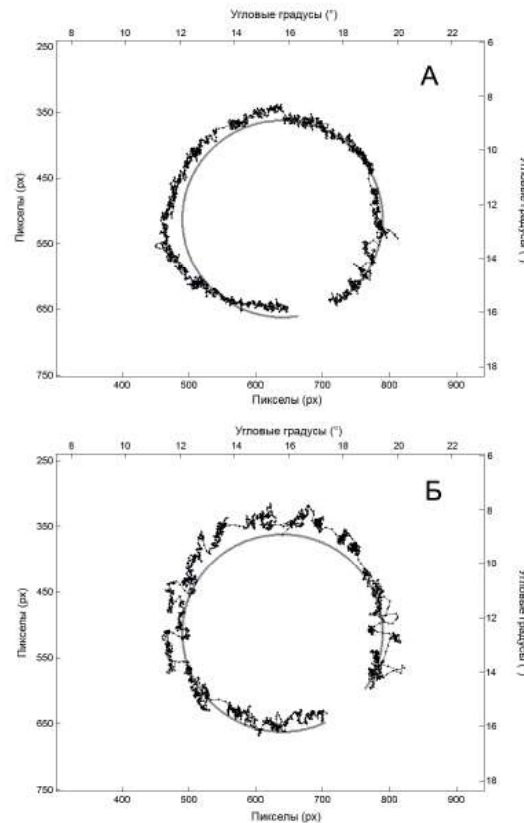


Рис. 3. Изменение характера прослеживания цели взглядом после приема алкоголя: испытуемый № 20, интервал с 59 по 66 секунду опыта. Серая траектория – траектория цели, черная – траектория взгляда. А – прослеживание цели до приема алкоголя, Б – после приема алкоголя

При дефиците прослеживания среднее отклонение от аппроксимирующей кривой должно увеличиться. Если после приема алкоголя траектория действительно становится менее плавной, а количество данных одинаково, тогда мы увидим четкие различия на гистограмме отклонений.

На рис. 4-А мы видим типичную форму распределения отклонений реальной траектории от аппроксимирующей кривой (15 испытуемых из 22). После приема алкоголя форма распределения значительно меняется: мода слегка смещается в сторону больших значений, значительно снижается амплитуда моды, пик становится менее острым, правая часть распределения становится более пологой. Указанные изменения характерны для испытуемых, у которых после приема алкоголя отмечается дефицит прослеживания.

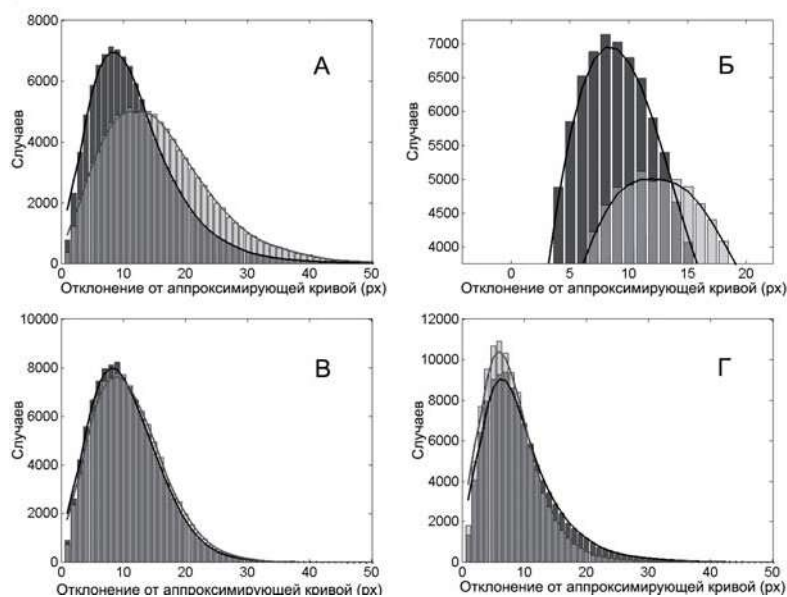


Рис. 4. Изменение отклонений реальной траектории от аппроксимирующей кривой под действием алкоголя:

темно-серая гистограмма – до приема алкоголя, светло-серая гистограмма – после приема алкоголя. А – наиболее типичная форма распределения (15 испытуемых из 22), Б – подгонка огибающей для вычисления амплитуды моды, В и Г – нетипичные формы распределения (соответственно 4 и 3 испытуемых из 22)

На рис. 4-В и 4-Г представлены нетипичные формы распределения отклонений: в одном случае (рис. 4-В) распределение практически не изменяется (а значит, не изменяется и плавность прослеживания цели), в другом случае (рис. 4-Г) мы наблюдаем ситуацию, противоположную типичной (степень плавности незначительно увеличивается). Количество нетипичных распределений невелико (соответственно 3 и 4 случая из 22), однако вместе они составляют примерно треть выборки.

На гистограммах хорошо видно, что наиболее явно после приема алкоголя изменяется амплитуда моды распределения. Соответственно, при количественном анализе плавности прослеживания цели взглядом в качестве основного показателя плавности прослеживания мы использовали нормированную амплитуду моды. Вычисляли ее следующим образом: сначала сглаживали данные гистограммы методом простого скользящего среднего с периодом 3; сглаживание проводили в два этапа: сначала от начала к концу вариационного ряда, затем от конца к началу (рис. 4-Б). По сглаженной кривой находили моду и амплитуду моды до и после приема алкоголя. Полученную амплитуду моды нормировали, разделив на количество отсчетов (строк с данными) в опыте.

Затем выполнялось сравнение нормированной амплитуды моды до и после приема алкоголя для всех испытуемых выборки с помощью теста знаков и теста связанных пар Вилкоксона. После приема алкоголя нормированная амплитуда моды (а значит и степень плавности траектории взгляда) с высокой достоверностью снижается ($p = 0,001$ – для теста знаков, $p = 0,003$ – для теста связанных пар Вилкоксона). Таким образом, после приема алкоголя типичным для выборки является уменьшение плавности прослеживания цели взглядом.



Помимо анализа собственно плавности прослеживания цели взглядом, была предпринята попытка соотнести изменение плавности прослеживания с изменением времени реакции. Использовался следующий алгоритм.

1. Вычислялся вектор разности для нормированной амплитуды моды до и после приема алкоголя (для каждого испытуемого из нормированной амплитуды моды после приема алкоголя вычитаем нормированную амплитуду моды до алкоголя).

2. Вычислялся вектор разности для времени реакции до и после приема алкоголя (аналогично, для каждого испытуемого из среднего времени реакции после приема алкоголя вычитаем среднее время реакции до приема алкоголя).

3. Полученные векторы разности использовались для построения диаграммы рассеяния (рис. 5).

4. Диаграмма рассеяния сопоставлялась с результатами статистического анализа.

Обсуждение результатов

Статистический анализ параметров зрительно-моторных реакций.

И для модели плавного прослеживания цели (тесты «Динамика», «Динамика и дополнительный стимул»), и для модели дискретного появления/исчезновения стимула (тест «Статика») статистический анализ параметров зрительно-моторных реакций дает практически одинаковый результат:

- латентный период макросаккад увеличивается;
- латентный период моторной реакции (первого движения мышцы) увеличивается;
- время реакции (время попадания в цель) увеличивается;
- средняя скорость макросаккад уменьшается.

Изменения указанных параметров во всех тестах имеют высокую, а иногда – очень высокую, достоверность. Однако при рассмотрении результатов отдельных испытуемых (табл. 1) легко заметить, что только один из исследованных параметров изменяется относительно стабильно и с высокой амплитудой – это средняя скорость макросаккад в тесте «Статика». Соответственно, только этот параметр может быть использован в качестве маркера абнормального состояния испытуемого, вызванного алкогольным опьянением.

Анализ плавности прослеживания цели взглядом.

Эффекты, связанные с изменением плавности прослеживания (smooth pursuit eye movement), многократно описаны в литературе (Holzman et al., 1974; Baloh et al., 1977; Kuechenmeister et al., 1977; Mialet et al., 1981; Avila et al., 2003). На их основе разработаны алгоритмы, позволяющие диагностировать наличие шизофрении (Levy et al., 2010), маниакально-депрессивного синдрома (Lipton et al., 1980), некоторых психозов (Holzman et al., 1977; Shagass et al., 1976), эпилепсии (Bittencourt et al., 1980), а также болезни Паркинсона (Lemos et al., 2013; Nilsson, 2013) и аутизма (Boraston et al., 2007; Dalton et al., 2005). Наличие нарушения плавности прослеживания или «дефицита» прослеживания при совершенно разных заболеваниях указывают на неспецифический характер этого явления. Наша задача состояла в том, чтобы оценить эффективность плавности прослеживания в роли маркера выхода из нормы и сопоставить изменения плавности прослеживания с изменениями эффективности деятельности.

В тесте «Динамика» при появлении дополнительного стимула испытуемый должен был попасть в цель, которую до этого непрерывно вел курсором мыши. Время попадания в цель в этом тесте сопоставимо со временем простой сенсомоторной реакции; оно является показателем эффективности работы оператора. Сопоставим изменение времени реакции (времени попадания в цель) с изменениями плавности прослеживания цели.



Согласно результатам статистического анализа, нормированная амплитуда моды (показатель плавности прослеживания) в целом по выборке с высокой достоверностью снижается ($p = 0,001384$ – для теста знаков, $p = 0,003302$ – для теста связанных пар Вилкоксона). Соответственно, увеличение амплитуды моды после приема алкоголя – нетипичная реакция для данной выборки. Аналогично, нетипичным является уменьшение среднего времени реакции после приема алкоголя ($p = 0,000014$, Т-критерий Стьюдента для связанных выборок). Если выделить все области нетипичных реакций серым цветом (рис. 5), то можно видеть, что в эти области попадают результаты четырех испытуемых. В оставшейся области (без заливки) хорошо видна группа точек с чрезвычайно высокой линейной корреляцией (рис. 5, овал) и группа из четырех точек, которые не коррелируют с остальными. У всех «нескоррелированных» точек изменение амплитуды моды лежит в диапазоне от 0 до $-0,01$.

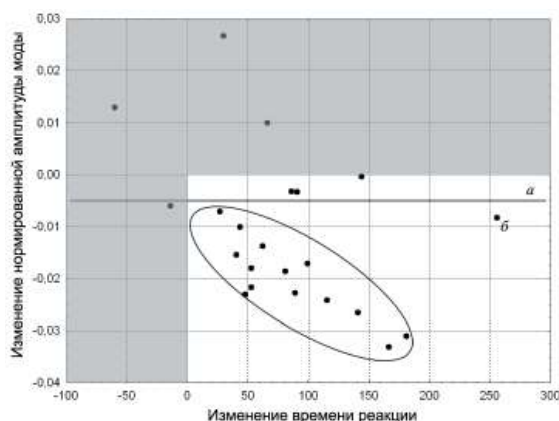


Рис. 5. Изменение плавности прослеживания и времени реакции под действием алкоголя:

по оси X – изменение среднего времени реакции (мс) (разность времени реакции после/до приема алкоголя), по оси Y – изменение нормированной амплитуды моды (плавности прослеживания); безразмерная величина, вычисляется как разность амплитуды моды после/до приема алкоголя. Область с серой заливкой – нетипичные для выборки реакции: *a* – предполагаемый порог снижения плавности прослеживания, на котором испытуемый еще сохраняет работоспособность; *b* – статистический выброс

Эти результаты интерпретируются нами следующим образом.

- Испытуемые, у которых после приема алкоголя нормированная амплитуда моды (плавность прослеживания) увеличивается или не изменяется, не теряют способности адекватно выполнять простую операторскую работу. Алкоголь на них либо не подействовал (не вызвал ухудшения функционального состояния), либо оказал стимулирующий эффект. Изменение плавности траектории взгляда и изменение времени реакции у них не скоррелированы. На рис. 5 эти испытуемые находятся в зоне с серой заливкой.

- Испытуемые, на которых алкоголь подействовал слабо, демонстрируют типичные для выборки, но слабо выраженные физиологические реакции: плавность прослеживания (амплитуда моды) у них уменьшается незначительно (от 0 до $-0,01$). При этом часть испытуемых сохраняют способность адекватно выполнять простую операторскую работу, поэтому четко выраженной зависимости между изменением плавности прослеживания (амплитуды моды) и изменением времени реакции нет. На рис. 5 – это группа точек в области без заливки в диапазоне изменения амплитуды моды от 0 до $-0,01$.

- Испытуемые, на которых алкоголь подействовал значительно, демонстрируют четкую линейную зависимость между изменением амплитуды моды (плавности прослеживания)



ния) и изменением времени реакции (качества операторской работы). На рис. 5 – это группа точек с высокой корреляцией и амплитудой моды от (-0,01) и ниже.

Остановимся подробнее на группе испытуемых, на которых алкоголь действовал слабо. Диапазон амплитуды моды от 0 до -0,01, по сути, является пороговой областью, ниже которой изменение амплитуды моды (плавности прослеживания) начинает четко коррелировать с изменением времени реакции (эффективности операторской работы). Задача точного вычисления порога, ниже которого начинается указанная корреляция, может быть решена за счет увеличения числа экспериментов. В нашем случае мы исключаем результаты одного испытуемого, которые являются явным статистическим выбросом (рис. 5, б) и получаем порог изменения амплитуды моды, равный -0,005, ниже которого остаются только скоррелированные результаты (рис. 5, а). Теперь мы можем вычислить коэффициенты корреляции для группы испытуемых, у которых показатели изменения плавности прослеживания и эффективности операторской работы четко скоррелированы (рис. 5, овал). Коэффициент линейной корреляции Пирсона для этой группы равен (-0,88) при $p < 0,00005$, коэффициент ранговой корреляции Спирмена равен (-0,84) при $p = 0,000091$. Как видим, полученная зависимость имеет высокую степень корреляции при очень высоком уровне достоверности. Примечательно, что на полученную линейную зависимость практически не влияет межиндивидуальная вариабельность реакций: изменения плавности прослеживания жестко коррелируют с изменением времени реакции вне зависимости от индивидуальной скорости реакции и плавности прослеживания, которые были зарегистрированы у испытуемых в контрольной серии опытов (до приема алкоголя).

При попытке сопоставить изменения плавности прослеживания и изменения времени реакции с количеством алкоголя в выдохе статистически значимых корреляций обнаружено не было.

Выводы

1. На всех использовавшихся моделях операторской деятельности (и на модели плавного прослеживания, и на модели дискретного появления/исчезновения стимула) статистические параметры макросаккад и моторных реакций в целом по выборке изменяются одинаково: латентный период макросаккад увеличивается, латентный период моторной реакции увеличивается, средняя скорость макросаккад уменьшается, время реакции (попадания в цель) увеличивается. Указанные изменения имеют высокую статистическую значимость.

2. После приема алкоголя наиболее стабильно и интенсивно изменяется средняя скорость макросаккад в ситуации статического появления/исчезновения стимула (уменьшается с высокой достоверностью в 19 из 22 случаев). Данный параметр расценивается нами как потенциально пригодный для аппаратурной диагностики функциональных состояний.

3. Изменение плавности прослеживания цели взглядом является маркером ухудшения работоспособности оператора и может быть использовано для прогнозирования нарушений операторской работоспособности.

4. Зависимость между изменением эффективности операторской работы после приема алкоголя и изменением величины латентных периодов макросаккад и моторной реакции носит вероятностный характер и в качестве маркеров изменения функционального состояния или нарушения деятельности использоваться не может.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского гуманитарного научного фонда (проект № 14-06-00652 «Изменение параметров зрительно-моторной координации под действием алкоголя у операторов и водителей транспортных средств»).



Литература

1. Avila M.T., Sherr J.D., Hong E., Myers C.S., Thaker G.K. Effects of nicotine on leading saccades during smooth pursuit eye movements in smokers and nonsmokers with schizophrenia // *Neuropsychopharmacology: official publication of the American College of Neuropsychopharmacology*. 2003. Vol. 28. № 12. P. 2184–2191. doi:10.1038/sj.npp.1300265
2. Baloh R.W., Honrubia V., Sills A. Eye-tracking and optokinetic nystagmus. Results of quantitative testing in patients with well-defined nervous system lesions // *The Annals of otology, rhinology, and laryngology*. 1977. Vol. 86. № 1. P. 108–114. doi: 10.1177/000348947708600119
3. Bittencourt P.R., Gresty M.A., Richens A. Quantitative assessment of smooth-pursuit eye movements in healthy and epileptic subjects // *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*. 1980. Vol. 43. № 12. P. 1119–1124. doi:10.1136/jnnp.43.12.1119
4. Boraston Z., Blakemore S.-J. The application of eye-tracking technology in the study of autism // *The Journal of Physiology*. 2007. Vol. 581. № 3. P. 893–898. doi:10.1113/jphysiol.2007.133587
5. Dalton K.M., Nacewicz B.M., Johnstone T., Schaefer H.S., Gernsbacher M.A., Goldsmith H.H., Alexander A.L., Davidson R.J. Gaze fixation and the neural circuitry of face processing in autism // *Nature neuroscience*. 2005. Vol. 8. № 4. P. 519–526. doi:10.1038/nn1421
6. Dinges D.F., Mallis M.M., Maislin G., Powell I.V. Evaluation of techniques for ocular measurement as an index of fatigue and the basis for alertness management. 1998 [Electronic edition]. URL: <http://ntl.bts.gov/lib/21000/21900/21955/PB99150237.pdf> (accessed 25.03.2016).
7. Dorrian J., Lamond N., Kozuchowski K., Dawson D. The driver vigilance telemetric control system (DVTCS): Investigating sensitivity to experimentally induced sleep loss and fatigue // *Behavior research methods*. 2008. Vol. 40. № 4. P. 1016–1025. doi:10.3758/BRM.40.4.1016
8. Edwards D.J., Sirois B., Dawson T., Aguirre A., Davis B., Trutschel U. Evaluation of fatigue management technologies using weighted feature matrix method [Electronic edition] // *Proceeding of the Fourth International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*. 2007. URL: http://drivingassessment.uiowa.edu/DA2007/PDF/026_EdwardsSorois.pdf (accessed 25.03.2016).
9. Hartley L., Horberry T., Mabbot N. Review of fatigue detection and prediction technologies. National Road Transport Commission. Melbourne, Australia 2000 [Electronic edition]. URL: https://www.researchgate.net/profile/Laurence_Hartley2/publication/238308422_REVIEW_OF_FATIGUE_DETECTION_AND_PREDICTION_TECHNOLOGIES/links/00b7d52c7b6bf34a63000000.pdf (accessed 25.03.2016).
10. Heitmann A., Gutkuhn R., Aguirre A., Trutschel U., Moore-Ede M. Technologies for the monitoring and prevention of driver fatigue [Electronic edition] // *Proceedings of the First International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*. 2001. P. 81–86. URL: https://www.researchgate.net/profile/Udo_Trutschel/publication/233389964_TECHNOLOGIES_FOR_THE_MONITORING_AND_PREVENTION_OF_DRIVER_FATIGUE/links/0fcfd50a13bf28da3e000000.pdf (accessed 25.03.2016).
11. Holzman P.S., Proctor L.R., Levy D.L., Yasillo N.J., Meltzer H.Y., Hurt S.W. Eye-tracking dysfunctions in schizophrenic patients and their relatives // *Archives of General Psychiatry*. 1974. Vol. 31. № 2. P. 143–151. doi:10.1001/archpsyc.1974.01760140005001
12. Holzman P.S., Levy D.L. Smooth pursuit eye movements and functional psychoses a review // *Schizophrenia Bulletin*. 1977. Vol. 3. № 1. P. 15–27. doi: 10.1093/schbul/3.1.15
13. Kerick S., Metcalfe J., Feng T., Ries A., McDowell K. Review of Fatigue Management Technologies for Enhanced Military Vehicle Safety and Performance. 2013 [Electronic edition]. URL: www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA588261 (accessed 25.03.2016).
14. Kuechenmeister C.A., Linton P.H., Mueller T.V., White H.B. Eye tracking in relation to age, sex, and illness // *Archives of General Psychiatry*. 1977. Vol. 34. № 5. P. 578–579. doi:10.1001/archpsyc.1977.01770170088008
15. Lemos J., Eggenberger E. Saccadic intrusions: review and update // *Current opinion in neurology*. 2013. Vol. 26. № 1. P. 59–66. doi: 10.1097/WCO.0b013e32835c5e1d
16. Levy D.L., Sereno A.B., Gooding D.C., O'Driscoll G.A. Eye tracking dysfunction in schizophrenia: characterization and pathophysiology // *Behavioral Neurobiology of Schizophrenia and Its Treatment*.



2010. P. 311–347. doi: 10.1007/7854_2010_60

17. Lipton R.B., Levin S., Holzman P.S. Horizontal and vertical pursuit eye movements, the oculocephalic reflex, and the functional psychoses // *Psychiatry Research*. 1980. Vol. 3. № 2. P. 193–203. doi: 10.1016/0165-1781(80)90036-0

18. Litvinova A.S., Ratmanova P.O., Evina E.I., Bogdanov R.R., Kunitsyna A.N., Napalkov D.A. Age-related changes in saccadic eye movements in healthy subjects and patients with Parkinson's disease // *Human Physiology*. 2011. Vol. 37. № 2. P. 161–167. doi: 10.1134/S0362119711010117

19. 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. Vol. 33. P. 849–858. doi:10.1038/sj.npp.1301458

20. Mialet J.P., Pichot P. Eye-tracking patterns in schizophrenia: An analysis based on the incidence of saccades // *Archives of General Psychiatry*. 1981. Vol. 38. № 2. P. 183–189. doi:10.1001/archpsyc.1981.01780270069009

21. Mrotek L.A., Soechting J.F. Target interception: hand-eye coordination and strategies // *Journal of Neuroscience*. 2007. Vol. 27. № 27. P. 7297–7309. doi: 10.1523/JNEUROSCI.2046-07.2007

22. Nilsson M.H., Patel M., Rehncrona S., Magnusson M., Fransson P.-A., others Subthalamic deep brain stimulation improves smooth pursuit and saccade performance in patients with Parkinson's disease // *Journal of neuroengineering and rehabilitation*. 2013. Vol. 10. № 1. P. 33. doi: 10.1186/1743-0003-10-33

23. Shagass C., Roemer R., Amadeo M. Eye-tracking performance and engagement of attention // *Archives of General Psychiatry*. 1976. Vol. 33. № 1. P. 121–125. doi:10.1001/archpsyc.1976.01770010077015

24. Stern J.A., Boyer D., Schroeder D. Blink rate: a possible measure of fatigue // *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*. 1994. Vol. 36. № 2. P. 285–297. doi: 10.1177/001872089403600209

25. Wright N., Stone B., Horberry T., Reed N. and others. A review of in-vehicle sleepiness detection devices. 2007 [Electronic edition]. URL: http://www.neurocom.ru/pdf/press/report_rsb_russian.pdf (accessed 25.03.2016).

OCULOGRAPHIC MARKERS OF ABNORMAL STATES OF AN OPERATOR AS STUDIED USING THE MODELS OF SMOOTH TRACKING OF A TARGET AND DISCREET APPEARANCE/DISAPPEARANCE OF A STIMULUS

ZAKHARCHENKO D.V.*, *Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,*
e-mail: dz-ihna@mail.ru

DOROKHOV V.B.***, *Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,*
e-mail: vbdorokhov@mail.ru

For citation:

Zakharchenko D. V., Dorokhov V. B. Oculographic markers of abnormal states of an operator as studied using the models of smooth tracking of a target and discreet appearance/disappearance of a stimulus. *Экспериментальная психология = Experimental psychology (Russia)*, 2016, vol. 9, no. 1, pp. 53–68. doi:10.17759/exppsy.2016090105

* Zakharchenko D.V. Cand. Sci. (Biology), Research Fellow, Institute of Higher Nervous Activity, RAS. E-mail: dz-ihna@mail.ru

*** Dorokhov V.B. Dr. Sci. (Biology), Head of Laboratory of Neurobiology of Sleep and Wake, Institute of Higher Nervous Activity, RAS. E-mail: dz-ihna@mail.ru



The possibility is discussed of using the parameters of oculomotor reactions as markers suitable for automatic evaluation, recognition and continuous monitoring of the functional state of an operator, i.e. driver, traffic controller, etc. We used the models of smooth tracking of targets and discrete appearance/disappearance of the stimulus for experimental evaluation of the possibility of recognition of abnormal states of an operator and the disturbances in work they cause. We describe and analyze the changes in visual-motor reactions under the influence of alcohol, 1 g of 96% alcohol per kilogram of operator's body weight of, i.e. changes in the latency period of macrosaccades and motor reactions, changes in the average instant speed of macrosaccades, changes in reaction time. The changes in smoothness of target tracking caused by alcohol intoxication were also considered. We identified the oculomotor reactions useful as markers to diagnose changes in the functional state of an operator and to diagnose the operator activity.

Keywords: eye-tracking, gaze scanpath, target object, saccade, fixation, alcohol, operator, functional state, visual perception, smooth tracking.

Funding.

This work was supported by the Russian Foundation for the Humanities, Project # 14-06-00652 "Changing the hand-eye coordination under the influence of alcohol on operators and drivers of vehicles".

References

1. Avila M.T., Sherr J.D., Hong E., Myers C.S., Thaker G.K. Effects of Nicotine on Leading Saccades during Smooth Pursuit Eye Movements in Smokers and Nonsmokers with Schizophrenia. *Neuropsychopharmacology*, 2003, vol. 28, no. 12, pp. 2184-2191. doi: 10.1038/sj.npp.1300265
2. Baloh R.W., Honrubia V., Sills A. Eye-Tracking and Optokinetic Nystagmus: Results of Quantitative Testing in Patients with Well-Defined Nervous System Lesions. *Annals of Otolaryngology, Rhinology & Laryngology*, 1977, vol. 86, no. 1, pp. 108-114. doi: 10.1177/000348947708600119
3. Bittencourt P.R., Gresty M.A., Richens A. Quantitative assessment of smooth-pursuit eye movements in healthy and epileptic subjects. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 1980, vol. 43, no. 12, pp. 1119-1124. doi: 10.1136/jnnp.43.12.1119
4. Boraston Z., Blakemore S.-J. The application of eye-tracking technology in the study of autism. *The Journal of Physiology*, 2007, vol. 581, no. 3, pp. 893-898. doi: 10.1113/jphysiol.2007.133587
5. Dalton K.M., Nacewicz B.M., Johnstone T., Schaefer H.S., Gernsbacher M.A., Goldsmith H.H., Alexander A.L., Davidson R.J. Gaze fixation and the neural circuitry of face processing in autism. *Nature Neuroscience*, 2005, vol. 8, no. 4, pp. 519-526. doi: 10.1038/nn1421
6. Dinges D.F., Mallis M.M., Maislin G., Powell I.V. *Evaluation of techniques for ocular measurement as an index of fatigue and the basis for alertness management*. 1998. Available at: <http://ntl.bts.gov/lib/21000/21900/21955/PB99150237.pdf> (Accessed: 25.03.2016).
7. Dorrian J., Lamond N., Kozuchowski K., Dawson D. The driver vigilance telemetric control system (DVTCS): Investigating sensitivity to experimentally induced sleep loss and fatigue. *Behavior Research Methods*, 2008, vol. 40, no. 4, pp. 1016-1025. doi: 10.3758/BRM.40.4.1016
8. Edwards D.J., Sirois B., Dawson T., Aguirre A., Davis B., Trutschel U. Evaluation of fatigue management technologies using weighted feature matrix method. In *Proceeding of the Fourth International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*, 2007. Available at: http://drivingassessment.uiowa.edu/DA2007/PDF/026_EdwardsSorois.pdf (Accessed: 25.03.2016).
9. Hartley L., Horberry T., Mabbot N. *Review of fatigue detection and prediction technologies*. National Road Transport Commission, Melbourne, Australia 2000. Available at: https://www.researchgate.net/profile/Laurence_Hartley2/publication/238308422_REVIEW_OF_FATIGUE_DETECTION_AND_PREDICTION_TECHNOLOGIES/links/00b7d52c7b6bf34a63000000.pdf (Accessed: 25.03.2016).
10. Heitmann A., Guttkuhn R., Aguirre A., Trutschel U., Moore-Ede M. Technologies for the monitoring and prevention of driver fatigue. In *Proceedings of the First International Driving Symposium on Human Factors in*



- Driver Assessment, Training and Vehicle Design*, 2001. 81-86. Available at: https://www.researchgate.net/profile/Udo_Trutschel/publication/233389964_TECHNOLOGIES_FOR_THE_MONITORING_AND_PREVENTION_OF_DRIVER_FATIGUE/links/0fcfd50a13bf28da3e000000.pdf (accessed: 25.03.2016).
11. Holzman P.S., Proctor L.R., Levy D.L., Yasillo N.J., Meltzer H.Y., Hurt S.W. Eye-Tracking Dysfunctions in Schizophrenic Patients and Their Relatives. *Archives of General Psychiatry*, 1974, vol. 31, no. 2, pp. 143. doi: 10.1001/archpsyc.1974.01760140005001
 12. Holzman P.S., Levy D.L. Smooth Pursuit Eye Movements and Functional Psychoses: A Review. *Schizophrenia Bulletin*, 1977, vol. 3, no. 1, pp. 15–27. doi: 10.1093/schbul/3.1.15
 13. Kerick S., Metcalfe J., Feng T., Ries A., McDowell K. *Review of Fatigue Management Technologies for Enhanced Military Vehicle Safety and Performance*. 2013. Available at: www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA588261 (Accessed: 25.03.2016).
 14. Kuechenmeister C.A., Linton P.H., Mueller T.V., White H.B. Eye Tracking in Relation to Age, Sex, and Illness. *Archives of General Psychiatry*, 1977, vol. 34, no. 5, pp. 578. doi: 10.1001/archpsyc.1977.01770170088008
 15. Lemos J., Eggenberger E. Saccadic intrusions. *Current Opinion in Neurology*, 2013, vol. 26, no. 1, pp. 59–66. doi: 10.1097/WCO.0b013e32835c5e1d
 16. Levy D.L., Sereno A.B., Gooding D.C., O'Driscoll G.A. Eye tracking dysfunction in schizophrenia: characterization and pathophysiology. In *Behavioral Neurobiology of Schizophrenia and Its Treatment*, 2010. Pp. 311-347. doi: 10.1007/7854_2010_60.
 17. Lipton R.B., Levin S., Holzman P.S. Horizontal and vertical pursuit eye movements, the oculocephalic reflex, and the functional psychoses. *Psychiatry Research*, 1980, vol. 3, no. 2, pp. 193–203. doi: 10.1016/0165-1781(80)90036-0
 18. Litvinova A.S., Ratmanova P.O., Evina E.I., Bogdanov R.R., Kunitsyna A.N., Napalkov D.A. Age-related changes in saccadic eye movements in healthy subjects and patients with Parkinson's disease. *Human Physiology*, 2011, vol. 37, no. 2, pp. 161–167. doi: 10.1134/S0362119711010117
 19. 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, vol. 33, no. 4, pp. 849–858. doi: 10.1038/sj.npp.1301458
 20. Mialet J.P. Eye-Tracking Patterns in Schizophrenia. *Archives of General Psychiatry*, 1981, vol. 38, no. 2, pp. 183. doi: 10.1001/archpsyc.1981.01780270069009
 21. Mrotek L.A., Soechting J.F. Target Interception: Hand-Eye Coordination and Strategies. *Journal of Neuroscience*, 2007, vol. 27, no. 27, pp. 7297–7309. doi: 10.1523/JNEUROSCI.2046-07.2007
 22. Nilsson M.H., Patel M., Rehnroona S., Magnusson M., Fransson P.-A. Subthalamic deep brain stimulation improves smooth pursuit and saccade performance in patients with Parkinson's disease. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2013, vol. 10, no. 1, pp. 33. doi: 10.1186/1743-0003-10-33
 23. Shagass C. Eye-Tracking Performance and Engagement of Attention. *Archives of General Psychiatry*, 1976, vol. 33, no. 1, pp. 121. doi: 10.1001/archpsyc.1976.01770010077015
 24. Stern J. A., Boyer D., Schroeder D. Blink rate: a possible measure of fatigue. *Human factors*, 1994, vol. 36, no. 2, pp. 285–297. doi: 10.1177/001872089403600209
 25. Wright N., Stone B., Horberry T., Reed N. *A review of in-vehicle sleepiness detection devices*, 2007. Available at: http://www.neurocom.ru/pdf/press/report_rssb_russian.pdf (Accessed: 25.03.2016).