



ИЗМЕНЕНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗРИТЕЛЬНО-МОТОРНЫХ РЕАКЦИЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ АЛКОГОЛЯ

ЗАХАРЧЕНКО Д. В., Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва

ДОРОХОВ В. Б., Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва

Целью работы являлся поиск изменений в окуломоторных реакциях и моторике руки, вызванных приемом средних доз алкоголя (1 грамм 96-процентного алкоголя на килограмм веса тела испытуемого). Использовались два типа моделей – модель статичного появления/исчезновения стимула и модель непрерывного ведения цели в процессе операторской деятельности. Анализ результатов исследования показателей изменения латентного периода макросаккады и первой моторной реакции, средней мгновенной скорости макросаккад, времени попадания в цель, а также визуальной проработки конфигурации макросаккад свидетельствует о том, что после приема алкоголя латентность макросаккады и моторной реакции достоверно возрастает, средняя мгновенная скорость макросаккад достоверно уменьшается. Эффективность операторской работы напрямую не связана с изменениями биологических параметров реакций. В отдельных случаях после приема алкоголя отмечены макросаккады необычной конфигурации, в том числе имеющие аномально низкую скорость.

Ключевые слова: зрительное восприятие, саккада, фиксация, окуломоторные реакции, кистевая моторика, траектория, алкоголь.

С появлением мощных и относительно дешевых вычислительных систем разработка систем безопасности, основанных на принципе автоматизированного контроля функционального состояния оператора (машиниста, водителя, авиадиспетчера), стала объективной реальностью (Wright et al., 2007). Существующие аппаратно-программные комплексы оценивают функциональное состояние, используя один из следующих методов: электроэнцефалографию (Belyavin, Wright, 1987), анализ сердечной активности (Egelund, 1982), движения головы (Heitmann et al.), время реакции на стимул (Mabbott, 1999), электродермальную активность (Dorokhov et al., 1998), движения глаз (Ceder, 1977), моргания (Stern et al., 1994), измерение части времени, когда глаза закрыты (PERCLOS) (Dinges et al., 1998). Однако эффективность подобных систем пока еще невелика, недостаточно разработаны биологические и поведенческие критерии, на основании которых могут распознаваться опасные для оператора состояния (утомление, монотония, дремота, потеря мотивации и т. д.). В настоящий момент одним из наиболее перспективных методов распознавания функциональных состояний считается анализ окуломоторных реакций. Различные исследователи в качестве потенциальных критериев изменения функционального состояния предлагают следующие показатели окуломоторной активности: изменение латентных периодов макросаккад и доли мультисаккад (Ратманова и др., 2006; Dorokhov, Zakharchenko, 2011), изменение параметров скоординированности между взглядом и движением рук (Marple-Horvat et al., 2008; Mrotek, Soechting, 2007), моргания и PERCLOS (Dinges et al., 1998; Stern et al., 1994).

В нашем исследовании мы попытались в лабораторных условиях смоделировать опасное для оператора с точки зрения алкогольного воздействия состояние с целью количественной оценки характера изменений параметров зрительно-моторных реакций. При мо-



делировании состояния решено было использовать алкоголь в средних дозах, руководствуясь при этом следующими соображениями: алкоголь как фармакологический агент хорошо изучен, его фармакокинетика известна, а воздействие понятно даже на бытовом уровне. Дозировка выбрана с учетом мировой практики такого рода исследований и обеспечивает необходимую интенсивность изменений функционального состояния испытуемого. Немаловажным является и тот факт, что эксперименты с алкоголем не требуют специального разрешения со стороны органов Минздрава и Госнаркоконтроля.

Методика исследования

Испытуемые. 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. Отбор претендентов проводился через Интернет и включал в себя информирование о процедуре исследования и первичный инструктаж (нормально выспаться, не употреблять алкоголь, кофе и медицинские препараты в день эксперимента и накануне, пообедать за два часа до начала тестов). Участие в исследовании оплачивалось. Таким образом, все согласившиеся принять участие в эксперименте имели необходимый опыт работы с компьютером и мышью, а также мотивацию, достаточную для выполнения тестовых заданий.

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

Регистрация физиологических показателей. Основным физиологическим показателем в нашей серии опытов были окуломоторные реакции испытуемых. Траектория движения взгляда регистрировалась при помощи системы видеотрекинга для бесконтактной видеорегистрации движений глаз (Eyegaze Development System, LC Technologies, USA), использующей принцип отражения инфракрасного света от роговицы глаза («ай-трекер») с программным обеспечением NYAN 2® компании Interactive Minds. Запись осуществлялась в бинокулярном режиме попеременно двумя камерами, суммарная частота опроса – 120 Гц, расстояние до экрана – 60 см, экранное разрешение – 1280 x 1024 пиксела, размеры пиксела – 0,265 мм. 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).

Психомоторные тесты. Для моделирования различных аспектов операторской деятельности нами были разработаны и программно реализованы на 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 движущуюся цель¹. Тесты предъявлялись в затемненной камере на жидкокристалличе-

¹ Модифицированная версия теста «Динамика и дополнительный стимул» использовалась также для исследования монотонии. Подробнее см.: Дорохов и др., 2011.

ском мониторе Samsung с диагональю 17 дюймов (340 x 270 мм, разрешение 1280 x 1024 пиксела) и легендировались как «стрельба по целям».

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20

Рис. 1. Тест «Статика»: разбивка экрана на секторы, стимул. При тестировании сетка и номера секторов не отображаются

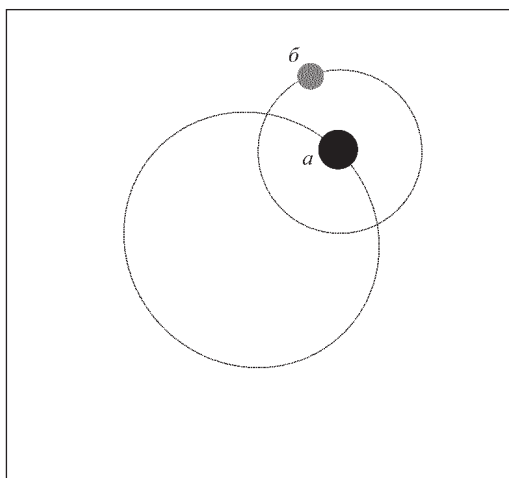


Рис. 2. Тесты «Динамика», «Динамика и дополнительный стимул» – траектории основной и дополнительной цели:

a – основная цель (зеленый круг); *b* – дополнительная цель (красный круг). Обе цели движутся по часовой стрелке. При тестировании траектории не отображаются

в секунду. Радиус орбиты дополнительной цели – 60 мм. Испытуемый получал инструкцию вести курсором мыши основную цель, стараясь не выходить за ее пределы; при появлении дополнительной цели он должен был быстро навести на нее курсор 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 должен

В тесте «Статика» (рис. 1) экран условно делили на 20 секторов в виде сетки (5 по горизонтали, 4 по вертикали); каждый сектор имел свой номер; границы секторов на экран не выводились. В начале опыта в центре одного из секторов появлялась цель в форме круга диаметром 5 мм, – испытуемый должен был максимально быстро навести на него курсор и щелкнуть мышью. При попадании цель исчезала и одновременно появлялась в центре другого сектора. Номер сектора программа выбирала автоматически с помощью генератора случайных чисел. 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 мыши и все щелчки записывались в лог-файл. Единичной пробой считалось предъявление одного стимула (т.е. все действия испытуемого с момента появления цели и до щелчка по цели мышью).

В тесте «Динамика и дополнительный стимул» цель (зеленый круг диаметром 12 мм) двигалась по круговой траектории диаметром 75 мм с угловой скоростью 28 градусов в секунду относительно центра экрана (рис. 2). Один раз за полный оборот с внешней стороны траектории цели появлялась дополнительная цель – красный круг диаметром 12 мм. Дополнительная цель начинала двигаться по круговой орбите вокруг основной цели с угловой скоростью 29 градусов



был 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); 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 (экспериментальная схема). Процедура исследования включала в себя две серии опытов: фоновую и тестовую (рис. 3).

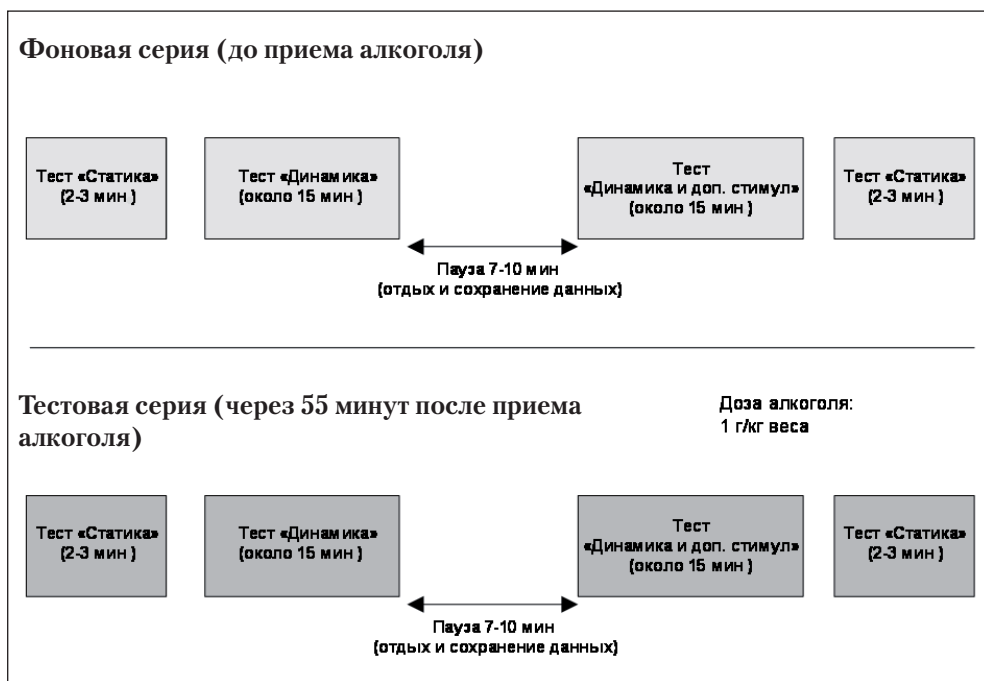


Рис. 3. Схема эксперимента

Сначала выполнялась фоновая 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 после небольшого перерыва (7–10 минут), в течение которого испытуемый мог встать, размяться, дать отдых глазам (перерыв нужен для того, чтобы избежать монотонии и не дать развиться утомлению), опять производилась калибровка аппаратуры, и без паузы испытуемые выполняли тесты «Динамика и дополнительный стимул» (15 минут) и «Статика» (около 3 минут). На этом фоновая серия заканчивалась, испытуемый переходил в другое помещение, там принимал алкоголь и в течение часа общался с экспериментатором на отвлеченные темы (пауза между фоновой и тестовой серией нужна, во-первых, чтобы дать алкоголю усвоиться и, во-вторых, чтобы избежать стимулирующего эффекта). Через час после приема алкоголя проводился контрольный замер количества алкоголя в выдохе и начиналась тестовая серия опытов, полностью аналогичная фоновой.

Результаты исследования и их обсуждение

Тест «Статика». В тесте «Статика» целевой объект (круг диаметром 5 мм) статически появляется и исчезает после щелчка по нему мышью. Количество предъявлений цели (проб) – 120. Единичной пробой считается временной интервал между появлением стимула и щелчком по нему мышью (попадание по цели).

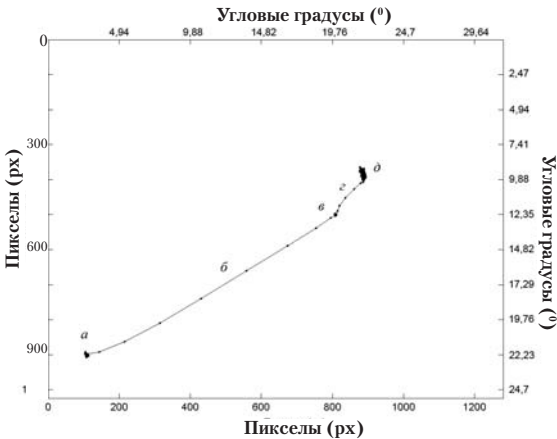


Рис. 4. Типичная траектория взгляда в единичной пробе теста «Статика»:

a – латентный период макросаккады; *б* – макросаккада; *в* – промежуточная фиксация; *г* – корректирующая саккада; *д* – фиксация вблизи цели

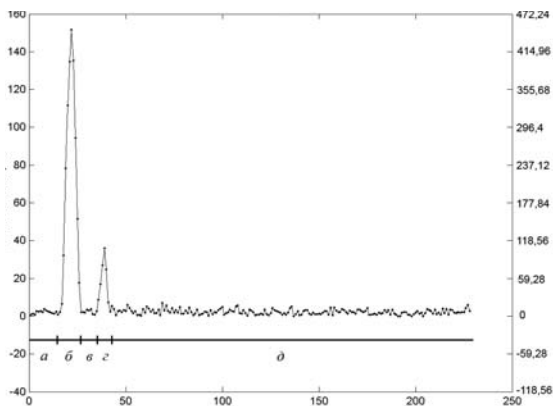


Рис. 5. График мгновенных скоростей для каждого опроса пробы:

по оси X – номер опроса в пробе; по оси Y – мгновенная скорость (левая шкала – пикселей за опрос, правая шкала – градусов в секунду)

ведомо не имеющими отношения к выполняемому тесту и изменению функционального состояния испытуемого.

Первый тип артефактов – отсутствие экранных координат взгляда в записи. Такие артефакты возникают в двух случаях: если зрачок испытуемого по каким-то причинам «выпал» из поля зрения регистрирующей камеры (как правило, при морганиях) или если имела место пауза в работе таймера программы, т.е. если пауза между соседними опросами была больше, чем штатный период опроса аппаратуры (для 120 Гц это 8,3 мс). Второй тип артефактов – ар-

С точки зрения анализа параметров окуломоторных реакций наибольший интерес представляет латентный период макросаккады и первая (обычно самая большая) макросаккада. Макросаккады от фиксаций и корректирующих саккад отличаются, в первую очередь, высокой мгновенной скоростью. На рис. 4–5 представлены типичная траектория и график мгновенных скоростей взгляда для единичной пробы теста «Статика». По графику мгновенных скоростей достаточно легко выделить латентный период макросаккады и саму макросаккаду. В нашем исследовании для детекции саккад и фиксаций использовался пороговый алгоритм: макросаккадой считали первый резкий скачок мгновенной скорости взгляда, имеющий длину не меньше трех опросов подряд. Началом макросаккады считали опрос, мгновенная скорость которого превышала 15 пикселей за опрос (44,46 угловых градуса в секунду). Конец макросаккады тоже определялся по пороговому алгоритму – первый опрос фиксации должен иметь мгновенную скорость не больше 8 пикселей за опрос (23,7 угловых градуса в секунду).

Чтобы иметь возможность проводить количественный анализ параметров окулографических и моторных реакций, необходимо удалить из анализа пробы с артефактами записи и реакциями, заве-



тефакты, вызванные поведенческой стратегией испытуемого. Инструкция требует от испытуемого работать максимально быстро и максимально точно, поэтому отдельные испытуемые в отдельных пробах начинают гадать, в каком месте появится новая цель. Третий тип артефактных проб – пробы, в которых макросаккады имели зигзагообразную, синусоидальную или совсем уж экзотическую траекторию. Как уже упоминалось, количество таких проб невелико и, соответственно, исключение их из обработки на статистические показатели не влияет. В то же время происхождение и физиологический смысл таких макросаккад неясен, поэтому зигзагообразные и синусоидальные пробы оценивались качественно (наличие / отсутствие, количество в тестах до и после приема алкоголя); из количественной обработки такие пробы исключались.

Поскольку последовательность секторов, в которых появляется цель, является общей для всех четырех тестов (два до приема алкоголя, два после приема алкоголя), для статистической обработки использовали *T*-критерий Стьюдента для связанных выборок. Проверка распределения на нормальность в тесте «Статика» и во всех последующих тестах производилась с помощью визуального анализа гистограмм распределения. Статистический анализ производился только для второго теста «Статика» до и после приема алкоголя. Первый тест «Статика» и в фоновой, и в тестовой серии был нужен, чтобы исключить влияние факторов обучения и вработывания, и, соответственно, не оценивался. В тесте «Статика» статистически оценивались следующие показатели:

- латентность первой макросаккады (мс);
- средняя мгновенная скорость макросаккады (пикселей за опрос или угловых градусов в секунду);
- время попадания в цель (мс);
- латентность первого движения мыши (мс).

На рис. 6 представлены результаты сравнения средних значений параметров зрительно-моторных реакций для всех испытуемых в тесте «Статика» до и после приема алкоголя.

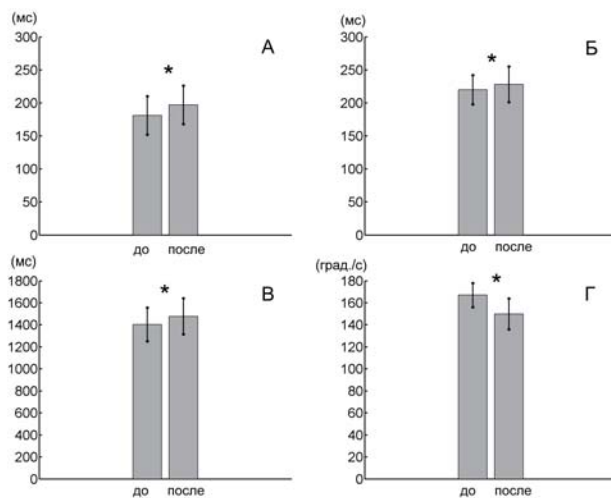


Рис. 6. Изменение параметров зрительно-моторных реакций под действием алкоголя для всех испытуемых (тест «Статика»).

Достоверные изменения (*T*-критерий Стьюдента для связанных выборок) отмечены звездочкой; зоны погрешности – среднеквадратичное отклонение:

A – изменение латентности макросаккад ($p=0,000001$); *B* – изменение латентности моторной реакции (первого движения мыши) ($p<0,02$); *B* – изменение времени попадания в цель ($p<0,004$); *Г* – изменение средней мгновенной скорости макросаккады ($p=0,00001$)

Латентность макросаккады, латентность моторной реакции и время попадания в цель достоверно увеличиваются, причем достоверность этих изменений достаточно высока, особенно для показателей латентности макросаккад, где уровень достоверности чрезвычайно высок ($p=0,000001$). Однако в абсолютных цифрах разница в латентностях макросаккад до и после приема алкоголя составляет в среднем порядка 15 мс, что не является значительной величиной. Гораздо более интересным результатом нам представляется резкое уменьшение средней мгновенной скорости макросаккад, – при уровне достоверности $p=0,000001$ средняя мгновенная скорость макросаккад уменьшается в среднем на 17 градусов в секунду, что превышает даже среднеквадратичное отклонение от среднего в каждом из тестов. Иными словами, уменьшение средней мгновенной скорости макросаккад после приема алкоголя не только имеет высокую статистическую достоверность, но и в количественном отношении достаточно велико.

Теперь посмотрим, как изменяются параметры зрительно-моторных реакций в каждом конкретном случае. В табл. 1 представлены результаты статистического сравнения для второго теста «Статика» до и после приема алкоголя для всей выборки. Номерами в первом столбце обозначены испытуемые (номер в столбце соответствует номеру испытуемого в нашей базе данных), последняя строка – средние значения.

Таблица 1. Изменение параметров зрительно-моторных реакций во втором тесте «Статика» до и после приема алкоголя

Ис- пыт.	Сред. латентность макросаккад (мс)			Сред. латентность моторной реакции (мс)			Сред. время попадания в цель (мс)			Сред. мгновенная скорость (град./с)		
	до	пос- ле	р	до	пос- ле	р	до	пос- ле	р	до	пос- ле	р
1	235	263	0,000	272	298	0,000	1626	1820	0,000	149	122	0,000
2	160	174	0,001	215	220	0,394	1432	1468	0,393	163	154	0,000
3	173	183	0,001	231	234	0,533	1260	1427	0,000	164	144	0,000
4	157	166	0,000	206	216	0,007	139	127	0,0	167	158	0,000
5	186	199	0,002	194	223	0,000	1264	1430	0,000	147	150	0,313
6	167	181	0,000	199	203	0,295	1250	1269	0,587	172	176	0,213
7	198	220	0,000	249	255	0,203	1619	1752	0,015	166	142	0,000
8	152	168	0,000	19	17	0,0	1287	1243	0,466	173	161	0,007
9	189	193	0,579	207	229	0,008	1360	1467	0,055	184	145	0,000
10	187	199	0,003	216	219	0,714	1494	1601	0,091	186	166	0,000
11	267	275	0,337	252	267	0,027	1531	1612	0,040	155	152	0,359



12	199	231	0,000	199	247	0,000	1241	1532	0,000	165	128	0,000
13	179	181	0,682	219	220	0,874	1443	1513	0,069	159	128	0,000
14	152	172	0,000	186	172	0,0	1207	1323	0,005	171	152	0,000
15	167	174	0,052	206	212	0,244	1346	126	0,01	162	156	0,002
16	165	177	0,000	22	20	0,00	1385	1314	0,066	190	168	0,000
17	164	184	0,001	228	226	0,801	1356	1399	0,322	168	133	0,000
18	218	212	0,321	228	228	0,977	1819	1761	0,486	161	142	0,000
19	170	204	0,000	218	244	0,000	1283	1510	0,000	178	156	0,000
20	185	210	0,000	230	246	0,003	1402	1459	0,092	164	152	0,000
21	164	175	0,001	247	246	0,672	1540	1555	0,739	163	156	0,047
22	156	186	0,000	210	233	0,000	1329	1518	0,000	171	154	0,000
Сред.	181	197	0,000	220	228	0,019	1403	1478	0,004	167	150	0,000

Примеч.: достоверность по Стьюденту (связанные выборки), $p < 0,05$.

Светло-серая заливка – показатель достоверно увеличивается; темно-серая – достоверно уменьшается; белая – изменения статистически не достоверны.

Анализируя табл. 1, легко заметить, что наиболее выраженные изменения параметров зрительно-моторных реакций (и они же – наиболее статистически достоверные) – это изменения величины латентного периода макросаккад и изменения средней мгновенной скорости макросаккад. Эти два параметра изменяются в подавляющем большинстве случаев; даже у испытуемых, где изменения не достоверны, как правило, сохраняется та же направленность изменений, что и у всей выборки. Данный результат позволяет интерпретировать изменение латентного периода и скорости макросаккад под действием алкоголя как критерии, потенциально пригодные для диагностики изменения функциональных состояний.

Тест «Динамика». В тесте «Динамика» испытуемый вел курсором цель (круг 8 мм), которая двигалась по круговой траектории. Периодически появлялась дополнительная цель, которая служила сигналом для щелчка по основной цели. После щелчка по основной цели дополнительная цель исчезала. Паузы между появлениями дополнительной цели варьировались в случайном порядке от 3 до 7 секунд; всего за тест предъявлялось порядка 150–180 дополнительных целей. Единичной пробой считался период времени с момента появления дополнительной цели и до щелчка мышью по основной цели.

В общем виде траектории основной цели, взгляда и курсора мыши в тесте до приема алкоголя изображены на рис. 7: при прослеживании медленно движущейся цели движение взгляда носит равномерный характер, саккады редки, артефактов мало. Взгляд может отставать от цели или опережать ее, но угловое расстояние от взгляда до цели при этом, как правило, не превышает 5 угловых градусов (т.е. проекция цели на сетчатку все время находится в пределах области наилучшего видения).

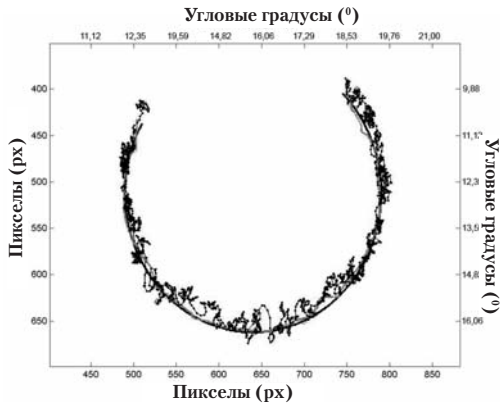


Рис. 7. Траектории движения основной цели, взгляда и курсора мыши в тесте «Динамика» до приема алкоголя.

Черная круговая траектория – траектория основной цели; черная ломаная линия – траектория взгляда; серая линия – траектория курсора мыши

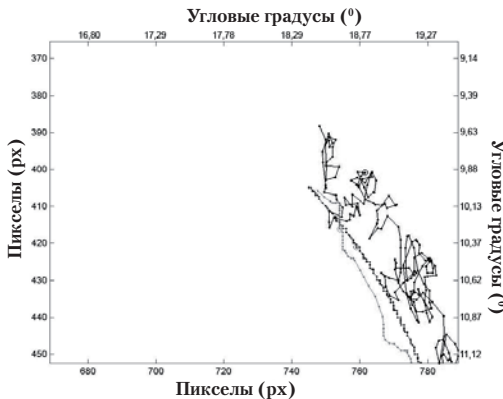


Рис. 8. Единичная проба теста «Динамика».

Начало пробы соответствует началу траектории; кружками обозначен момент щелчка по основной цели.

Черная круговая траектория – траектория основной цели; черная ломаная траектория – траектория взгляда; серая траектория – траектория курсора мыши

Исходя из вышесказанного, вряд ли возможно использовать изменение времени реакции в качестве однозначного критерия для диагностики функциональных состояний (в нашем случае – состояния алкогольного опьянения), однако общая направленность изменений данного параметра сомнений не вызывает.

Тест «Динамика и дополнительный стимул». В тесте «Динамика и дополнительный стимул» испытуемый вел курсором цель (круг 12 мм), которая двигалась по круговой траектории. При появлении дополнительной цели (красный круг 12 мм, двигался по орбите вокруг основной цели) испытуемый максимально быстро наводил на нее курсор и щелкал мышью. При попадании дополнительная цель исчезала, а испытуемый продолжал вести кур-

Траектории цели, взгляда и курсора мыши в единичной пробе изображены на рис. 8: взгляд находится вблизи ведомого объекта, саккад нет, явных подтормаживаний тоже нет. Видимых изменений в траектории курсора мыши не наблюдалось. Иными словами, в нормальном состоянии при ведении объекта необходимость отреагировать на дополнительный стимул (щелкнуть по цели) никак не сказывается на траектории взгляда или курсора мыши, поэтому единственным параметром, который мы оценивали в тесте «Динамика», было время попадания в цель.

На рис. 9 и в табл. 2 представлены изменения времени реакции на появление дополнительной цели после приема алкоголя. Изменения в целом по выборке выглядят более чем убедительно: разница во времени реакции в тестах до и после приема алкоголя составляет в среднем 82 мс, уровень достоверности ($p=0,000014$) также чрезвычайно высок. Однако, если рассматривать результаты отдельных испытуемых (табл. 2), становится ясно, что примерно в трети случаев различия не достоверны, а высокая степень различий по выборке в целом возникает за счет одностороннего характера изменений: из 22 испытуемых только у одного время реакции сокращалось, в то время как у 21 испытуемого время реакции увеличивалось.

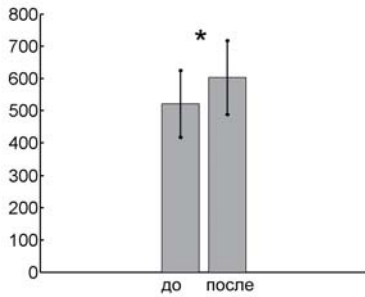


Рис. 9. Изменение времени реакции (времени щелчка по цели) под действием алкоголя в тесте «Динамика».

Достоверные изменения (T -критерий Стьюдента для связанных выборок) отмечены звездочкой, $p=0,000014$, зоны погрешности – среднеквадратичное отклонение

Таблица 2. Изменение времени реакции (времени щелчка по цели) в тесте «Динамика» до и после приема алкоголя

Испыт.	Среднее время щелчка по цели (мс)		
	до	после	p
1	530	611	0,007
2	467	556	0,007
3	497	678	0,011
4	418	445	0,088
5	431	484	0,006
6	494	524	0,126
7	696	762	0,226
8	572	558	0,852
9	541	481	0,012
10	561	652	0,005
11	573	621	0,108
12	543	799	0,000
13	518	605	0,000
14	349	401	0,000
15	433	549	0,000
16	527	568	0,105
17	571	634	0,292
18	853	896	0,505
19	462	606	0,000
20	442	542	0,000
21	459	626	0,000
22	526	667	0,000
Сред.	521	603	0,000

сором основную цель. Дополнительная цель могла появляться строго в момент, когда основная цель находилась в одной из четырех крайних точек своей траектории: вверху, внизу, слева или справа; дополнительная цель появлялась с внешней стороны от основной цели и предъявлялась один раз за полный оборот основной цели (примерно 20 секунд). Всего за опыт предъявлялось порядка 70–80 дополнительных стимулов. Единичной пробой считался период времени с момента появления дополнительной цели и до щелчка мышью по дополнительной цели.

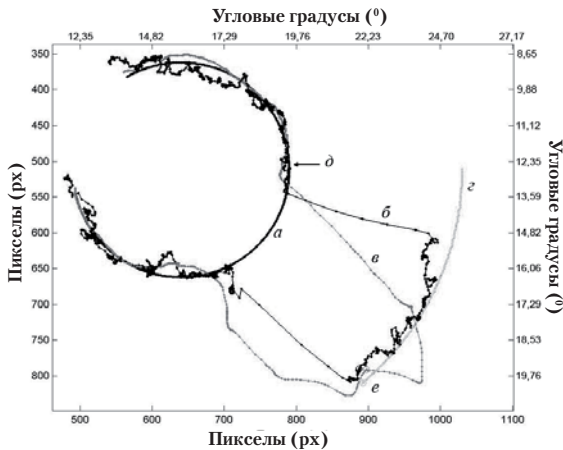


Рис. 10. Траектории движения основной цели, дополнительной цели, взгляда и курсора мыши при выполнении теста «Динамика и дополнительный стимул»:

a – траектория основной цели; *б* – траектория взгляда; *в* – траектория курсора мыши; *г* – траектория дополнительного стимула; *д* – момент появления дополнительного стимула; *е* – момент щелчка мышью по дополнительной цели (обозначен кружком для взгляда, мыши и дополнительного стимула)

ется либо синхронно с началом макросаккады, либо несколько позже. В отличие от макросаккады, курсор обычно движется под углом к дополнительной цели так, чтобы оказаться на пути дополнительной цели и там ее перехватить. Курсор как бы «поджидает» дополнительную цель на ее предполагаемой траектории; при наползании цели на курсор испытуемый делает щелчок мышью. Испытуемые, как правило, не пытаются догнать дополнительную цель курсором, – напротив, они стараются мысленно просчитать траекторию дополнительной цели и расположить курсор на ее пути. После попадания дополнительная цель исчезает, а взгляд и курсор возвращаются к основной цели и ведут ее дальше.

Для статистического анализа в тесте «Динамика и дополнительный стимул» использовались следующие показатели:

1. Величина латентного периода макросаккады (время, необходимое чтобы неосознанно просчитать величину, скорость и геометрические параметры макросаккады).
2. Величина латентного периода движения курсора мыши (время, необходимое чтобы просчитать траекторию дополнительной цели, величину упреждения и параметры моторной реакции).
3. Средняя мгновенная скорость макросаккад (как показатель изменений в работе зрительного анализатора под действием алкоголя).
4. Время попадания в цель (как показатель изменения эффективности операторской работы под действием алкоголя).

Момент начала макросаккады и длительность макросаккады вычислялись с применением порогового алгоритма, аналогичного тому, что использовался в тесте «Статика».

В общем виде траектории целей, взгляда и курсора представлены на рис. 10. Как и в тесте «Динамика», на участках без дополнительного стимула у нормального испытуемого мы наблюдаем преимущественно равномерный дрейф взгляда практически без саккад; траектория курсора близка к траектории основной цели. При появлении дополнительного стимула (рис. 10, *д*) взгляд и курсор какое-то время продолжают двигаться за основной целью, затем следует быстрая макросаккада к дополнительной цели (рис. 10, *б*), после чего взгляд начинает вести дополнительную цель и ведет ее вплоть до момента щелчка мышью по цели (рис. 10, *е*).

Траектория курсора мыши во многом похожа на траекторию взгляда: резкое быстрое движение курсора к дополнительной цели обычно начинается

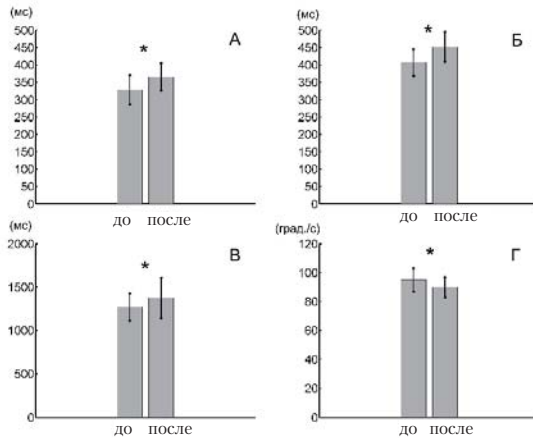


Рис. 11. Изменение параметров зрительно-моторных реакций под действием алкоголя для всех испытуемых (тест «Динамика и дополнительный стимул»).

Достоверные изменения (*T*-критерий Стьюдента для связанных выборок) отмечены звездочкой, зоны погрешности – средноквадратичное отклонение.

A – изменение латентности макросаккад ($p=0,000027$); *B* – изменение латентности моторной реакции (первого движения мыши) ($p=0,000035$); *B* – изменение времени попадания в цель ($p=0,01023$); *G* – изменение средней мгновенной скорости макросаккады ($p=0,000739$)

реакций в каждом конкретном случае. В табл. 3 представлены результаты выполнения теста «Динамика и дополнительный стимул» до и после приема алкоголя для каждого испытуемого.

Таблица 3. Изменение параметров зрительно-моторных реакций в тесте «Динамика и дополнительный стимул» до и после приема алкоголя

Ис-пыт.	Сред. латентность макросаккад (мс)			Сред. латентность моторной реакции (мс)			Сред. время попадания в цель (мс)			Сред. мгновенная скорость (град. / с)		
	до	пос-ле	p	до	пос-ле	p	до	пос-ле	p	до	пос-ле	p
1	357	439	0,000	404	488	0,000	1385	1660	0,009	92	80	0,000
2	279	312	0,000	367	404	0,001	1209	1289	0,168	100	94	0,009
3	278	337	0,000	386	448	0,000	1156	1325	0,010	97	94	0,422
4	327	347	0,044	366	395	0,006	1212	1226	0,814	99	93	0,001
5	281	290	0,502	367	374	0,557	1102	1120	0,687	89	84	0,091
6	377	33	0,0	44	40	0,00	131	117	0,04	98	95	0,288
7	365	381	0,229	423	461	0,009	1547	2185	0,001	92	84	0,013

На рис. 11 представлены результаты сравнения параметров зрительно-моторных реакций для теста «Динамика и дополнительный стимул» в целом по выборке. Как и в тесте «Статика», латентность макросаккад, латентность моторных реакций и время попадания в цель достоверно увеличиваются. Латентность макросаккад и моторной реакции увеличивается в среднем на 37 и 45 миллисекунд соответственно, что по длительности сопоставимо с временем восприятия стимула (порядка 40–50 мс). Время попадания в цель увеличивается в среднем на 107 миллисекунд, что сопоставимо с временем простой сенсомоторной реакции (порядка 100 мс), а средняя мгновенная скорость, наоборот, с высокой достоверностью снижается – совсем как в тесте «Статика».

Теперь рассмотрим, как изменяются параметры зрительно-моторных

8	290	349	0,006	375	488	0,000	1106	1295	0,019	106	95	0,006
9	345	389	0,004	446	487	0,011	1279	1263	0,795	95	102	0,408
10	320	339	0,219	430	428	0,853	1444	1476	0,717	102	95	0,008
11	398	413	0,533	455	452	0,861	1505	1524	0,878	75	77	0,484
12	296	382	0,000	388	494	0,000	1128	1409	0,000	87	85	0,395
13	366	385	0,177	457	490	0,011	1246	1319	0,071	105	95	0,005
14	269	308	0,000	335	387	0,000	1057	1085	0,638	94	89	0,096
15	376	418	0,015	342	442	0,000	1068	1312	0,000	78	77	0,706
16	239	349	0,000	384	430	0,000	1309	1241	0,313	102	99	0,372
17	343	374	0,184	458	474	0,337	1230	1189	0,434	94	95	0,556
18	341	387	0,064	445	462	0,439	1622	1585	0,762	93	93	0,977
19	329	335	0,513	397	417	0,054	1162	1303	0,008	97	92	0,026
20	373	391	0,221	428	475	0,008	1331	1300	0,647	92	88	0,104
21	342	414	0,000	419	500	0,000	1373	1443	0,330	100	102	0,615
22	340	391	0,011	433	546	0,000	1146	1540	0,000	94	82	0,000
Сред.	329	366	0,000	407	452	0,000	1269	1376	0,01	95	90	0,001

Примеч.: достоверность по Стьюденту (связанные выборки), $p < 0,05$.

Светло-серая заливка – показатель достоверно увеличивается; темно-серая – достоверно уменьшается; белая – изменения не достоверны

Как видим, далеко не во всех случаях достоверные изменения одного показателя соответствуют достоверным изменениям остальных показателей. Однако направленность изменений в подавляющем большинстве случаев соответствует направленности изменения средних значений по выборке. Этот результат указывает на то, что при диагностике функциональных состояний для достижения оптимального результата необходимо учитывать изменения сразу нескольких параметров.

Особенности траекторий взгляда (визуальный анализ). Визуальным анализом траекторий движения взгляда до и после приема алкоголя удалось выделить два типа изменений в траекториях саккад при перемещении взгляда с одного объекта на другой.

Первая особенность окуломоторных реакций после приема алкоголя – уменьшение скорости перемещений взгляда между целями в отдельных пробах. Данный эффект наблюдался у всех испытуемых. На рис. 12 изображены в одинаковом масштабе траектории перемещений взгляда между двумя стимулами для теста «Статика».

Траектории даны для одной и той же пробы до и после приема алкоголя. Испытуемый – один и тот же. Начало макросаккады – справа. Как нетрудно заметить, траектория становится намного менее гладкой, а мгновенные скорости на наиболее быстром участке смещения взора значительно уменьшаются, чем в пробе без алкоголя. В отдельных пробах средняя скорость перемещения глаза от одного объекта к другому уменьшается в 10–15 раз.

На рис. 13 изображены траектории перемещений взгляда для одной из проб теста «Динамика и дополнительный стимул».

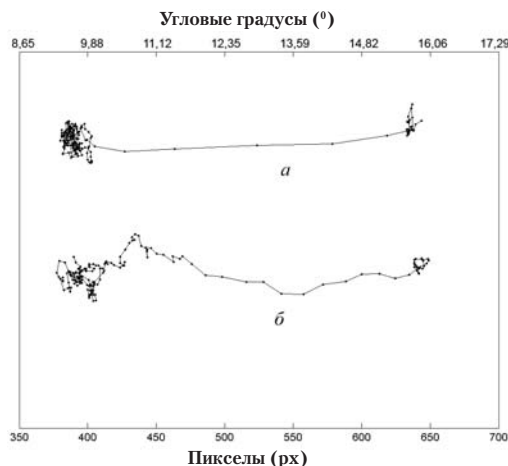


Рис. 12. Траектории перемещений взгляда испытуемого П.:

a – до приема алкоголя; *b* – после приема алкоголя. По оси X – экранные координаты в пикселях и угловых градусах. Траектории даны для одной и той же пробы до и после приема алкоголя. Испытуемый – один и тот же. Начало макросаккады – справа. Как нетрудно заметить, траектория становится намного менее гладкой, а мгновенные скорости на наиболее быстром участке смещения взгляда значительно уменьшаются по сравнению с пробами без алкоголя. В отдельных пробах средняя скорость перемещения глаза от одного объекта к другому уменьшается в 10–15 раз

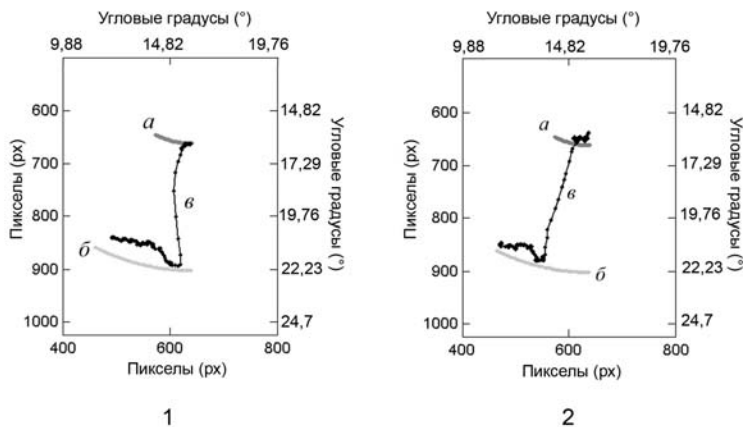


Рис. 13. Траектории перемещений взгляда испытуемого в тесте «Динамика и дополнительный стимул» до и после приема алкоголя:

1 – траектории до приема алкоголя; 2 – траектории после приема алкоголя; *a* – траектория основной цели; *b* – траектория дополнительной цели; *в* – траектория взгляда

Здесь наблюдается та же закономерность, что и в тесте «Статика»: после приема алкоголя мгновенные скорости макросаккады значительно уменьшаются.

Следует отметить, что резкое снижение мгновенных скоростей макросаккад после приема алкоголя наблюдается не во всех пробах и даже не в большинстве из них. Макросаккады с низкими мгновенными скоростями в пробах с алкоголем достаточно редки и составляют в среднем порядка 5% от общего числа проб. Но в пробах без алкоголя они не

встречаются вообще, что позволяет считать пробы с «медленными» макросаккадами характерной чертой состояния алкогольного опьянения. Интересно также, что эти пробы обычно являются одиночными, т. е. не объединяются в серии: в пробах до и после пробы с «медленной» макросаккадой макросаккады, как правило, имеют обычную скорость.

Небольшое количество и способ распределения проб с «медленной» макросаккадой позволяют предположительно интерпретировать их как кратковременные эпизоды резкого снижения уровня бодрствования, которые, тем не менее, не перерастают в засыпание, монотонию или другие нарушения деятельности.

Вторая особенность окуломоторных реакций после приема алкоголя – появление траекторий, имеющих зигзагообразную или синусоидальную форму. На рис. 14 представлены образцы таких траекторий.

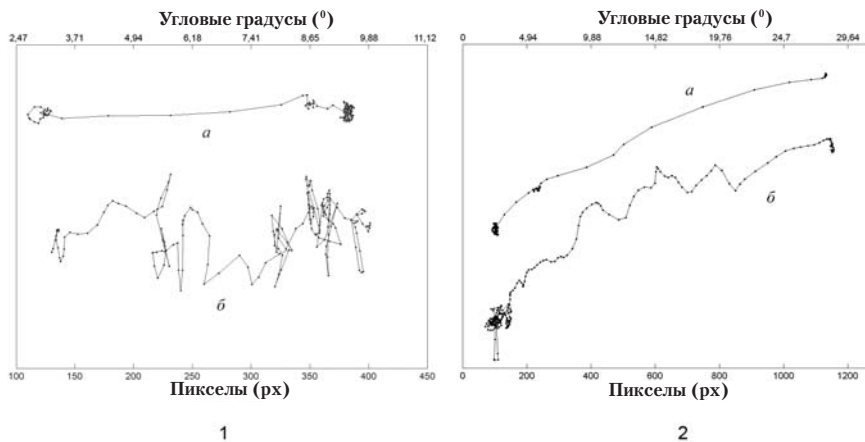


Рис. 14. Зигзагообразная и синусоидальная траектории:

1 – зигзагообразная траектория (начало макросаккады – слева); 2 – синусоидальная траектория (начало макросаккады – справа); а – траектория до приема алкоголя; б – после приема алкоголя. По оси X – экранные координаты в пикселях и угловых градусах

Зигзагообразные и синусоидальные траектории встречаются редко и не у всех испытуемых (в нашей серии опытов отмечены у 6 из 22 испытуемых). В фоновых сериях тестов (до приема алкоголя) не встречаются вообще. В большинстве случаев «странная» форма макросаккады сочетается с низкой скоростью перемещения взгляда (как на рис. 14.2), что позволяет предположительно интерпретировать их как эпизоды с кратковременным резким снижением уровня бодрствования.

Физиологический механизм возникновения обоих обнаруженных эффектов (резкое уменьшение скорости и необычная форма макросаккад) в данный момент непонятен и нуждается в дополнительном исследовании. Однако очевидная соотнесенность этих эффектов с состоянием алкогольного опьянения позволяет говорить о них как о потенциальных критериях, пригодных для аппаратурного распознавания функциональных состояний.

Выводы

1. И в тестах на статику, и в тестах на динамику в целом по выборке статистические параметры макросаккад изменяются одинаково: латентность макросаккад увеличивается, латентность моторной реакции увеличивается, средняя мгновенная скорость макросаккад



уменьшается, время попадания в цель увеличивается. В целом по выборке изменения имеют высокую достоверность.

2. Эффективность операторской работы конкретного испытуемого (время попадания в цель) напрямую не зависит от степени изменения параметров зрительно-моторных реакций (величины латентных периодов макросаккад и моторной реакции, средней скорости макросаккад) и количества алкоголя в крови.

3. После приема алкоголя наиболее интенсивно изменяется средняя скорость макросаккад в статических тестах (уменьшается с высокой достоверностью в 19 из 22 случаев). Данный параметр расценивается нами как потенциально пригодный для аппаратурной диагностики функциональных состояний.

4. После приема средних доз алкоголя у испытуемых резко снижается средняя скорость отдельных макросаккад; могут появляться макросаккады зигзагообразной и синусоидальной формы. Общее количество аномальных макросаккад – не больше 5%.

5. Аномальные макросаккады, как правило, являются единичными и встречаются как в тестах со статично появляющимися стимулами, так и в тестах на динамическое ведение цели курсором.

Литература

Дорохов В.Б., Арсеньев Г.Н., Захарченко Д.В., Лаврова Т.П., Ткаченко О.Н., Дементюенко В.В. Психомоторный тест для исследования зрительно-моторной координации при выполнении монотонной деятельности по прослеживанию цели // Журн. высш. нервн. деят. 2011. Т. 6. № 14. С. 1–9.

Ратманова П.О., Евина Е.И., Напалков Д.А., Богданов Р.Р., Турбина Л.Г. Нарушения саккадических движений глаз на разных стадиях болезни Паркинсона // Альманах клинической медицины. 2006. № 13. С. 90–93.

Belyavin A., Wright N. Changes in electrical activity of the brain with vigilance. // *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*. 1987. № 66. P. 137–144.

Ceder A. Driver's eye movements as related to attention in simulated traffic flow conditions // *Human Factors*. 1977. № 19. P. 571–581.

Dinges D.F., Mallis M.M., Maislin G., Powell IV J.W. Final Report: Evaluation of Techniques for Ocular Measurement as an Index of Fatigue and as the Basis of Alertness Management, US National Highway Traffic Safety Administration, Report no DOT HS 808 762, April 1998.

Dorokhov V.B., Zakharchenko D.V. Alcohol effects on eye and hand movements during different attention processes // Abstracts of the 16th European Conference on Eye Movements. 2011. P. 172.

Dorokhov V.B., Dementienko V.V., Koreneva L.G., Markov A.G., Tarasov A.V., Shakhnarovitch V.M. On the possibility of using EDR for estimation of vigilance changes // *International Journal of Psychophysiology*, 1998. № 30. P. 267.

Egelund N. Spectral analysis of heart rate variability as an indicator of driver fatigue // *Ergonomics*. 1982. № 25. P. 663–672.

Heitmann A.A., Guttkuhn R., Aguirre A., Trutschel U., Moore-Ede M. Technologies for the monitoring and prevention of driver fatigue // *Proceedings of the First International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*. Lexington, MA 02421, USA.

Mabbott N. Procedures and Devices to Monitor Operator Alertness Whilst Operating Machinery in Open-Cut Coal Mines. ARRB Transport Research. 1999.

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. P. 849–858.

Mrotek L.A., Soechting J.F. Target interception: hand-eye coordination and strategies // *Journal of Neuroscience*. 2007. V. 27. № 27. P. 7297–7309.

Stern J.A., Boyer D., Schroeder D. Blink rate: a possible measure of fatigue // *Human Factors*. 1994. № 36. P. 285–297.

Wright N., Stone B., Horberry T., Reed N. A review of in-vehicle sleepiness detection devices // *Published Project Report PPR 157*. TRL Limited. 2007.

CHANGES IN SOME PARAMETERS OF VISUAL-MOTOR REACTIONS UNDER THE INFLUENCE OF ALCOHOL

ZAKHARCHENKO D. V., *Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology RAS, Moscow*

DOROKHOV V. B., *Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology RAS, Moscow*

The aim of the work is the research changes in oculomotor responses and arm motor movements, caused by the intake of averages doses of alcohol (1 g of 96% alcohol per kilogram of body weight of the subject). We used two types of models - the model of the static appearance/disappearance of the stimulus and the model of continuous maintenance of a goal in the process of the operator's activities. Analysis of the results of research of changes of the latent period of the macrosaccade and the first motor reaction, the average instantaneous speed of macrosaccade, time hitting the target, as well as visual study of the configuration of macrosaccades, testifies to the fact that after the admission of alcohol the latency of the macrosaccade and motor reaction reliably increases, the average instantaneousness of speed of macrosaccades is significantly decreased.

The efficiency of the operator's work is not directly related to changes in the biological parameters of the reactions. In some cases, after the admission of alcohol the macrosaccades of the unusual configuration including an anomalously low speed were marked.

Keywords: visual perception, saccade, fixation, oculomotor reactions carpal motility, trajectory and alcohol.

Transliteration of the Russian references

Dorokhov V.B., Arsen'ev G.N., Zakharchenko D.V., Lavrova T.P., Tkachenko O.N., Dementienko V.V. Psihomotornyj test dlja issledovanija zritel'no-motornoj koordinacii pri vypolnenii monotonnoj dejatel'nosti po proslezhivaniju celi // *Zhurn. vyssh. nervn. dejat.* 2011. T. 6. № 14. S. 1–9.

Ratmanova P.O., Evina E.I., Napalkov D.A., Bogdanov R.R., Turbina L.G. Narushenija sakkadicheskikh dvizhenij glaz na raznyh stadijah bolezni Parkinsona // *Al'manah klinicheskoj mediciny*. 2006. № 13. S. 90–93.