

На правах рукописи

ЗАХАРЧЕНКО Дмитрий Валерьевич

ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОКУЛОМОТОРНЫХ И ДВИГАТЕЛЬНЫХ
РЕАКЦИЙ ОПЕРАТОРА ПОД ДЕЙСТВИЕМ АЛКОГОЛЯ

03.03.01 – Физиология

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата
биологических наук

Москва – 2015

Работа выполнена в лаборатории нейробиологии сна и бодрствования (зав. лабораторией – доктор биологических наук В. Б. Дорохов) Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии Российской Академии Наук (директор – член-корреспондент РАН П. М. Балабан).

Научный руководитель: доктор биологических наук
ДОРОХОВ Владимир Борисович

Официальные оппоненты:

Безденежных Борис Николаевич – доктор психологических наук, кандидат медицинских наук, профессор, институт психологии РАН, ведущий научный сотрудник

Шишкин Сергей Львович – кандидат биологических наук, НИЦ "Курчатовский институт", начальник лаборатории нейроэргономики и интерфейсов мозг-компьютер

Ведущая организация: биологический факультет Московского
Государственного Университета им. М. В.
Ломоносова.

Защита состоится 21 января 2015 года в 14.00 часов на заседании Диссертационного совета Д.002.044.01 при Институте высшей нервной деятельности и нейрофизиологии Российской Академии Наук (Москва, 117485, ул. Бутлерова, 5а).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН или на сайте <http://www.ihna.ru/>

Автореферат разослан _____ 2014 года

Учёный секретарь
Диссертационного совета Д.002.044.01

Доктор биологических наук



В. Н. Иерусалимский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

Зрительно-моторная координация необходима для успешной операторской деятельности. Различные типы задач, таких как вождение автомобиля или работа оператора в стационарных условиях, требуют разнообразных моторных паттернов с различным уровнем взаимодействия между движениями глаз и рук. Общеизвестно, что большинство аварий на транспорте и опасных производствах вызвано влиянием т.н. человеческого фактора – операторской ошибкой, возникшей вследствие изменения функционального состояния оператора (водителя, диспетчера). Изменения функционального состояния оператора могут иметь различную природу и их обычно описывают с помощью общего термина – «состояния со сниженной работоспособностью». К таким состояниям относят утомление, монотонию, напряжение/стресс, различные интоксикации и некоторые состояния, возникающие под действием фармакологических препаратов (Леонова, Величковская 2002; Ильин 2005).

Проблема автоматического распознавания состояний человека-оператора существует с момента появления сложных инженерных систем. В последние годы большое внимание уделяется разработке технических систем для мониторинга, контроля и предотвращения опасных функциональных состояний оператора (т.н. fatigue monitoring devices) (Dorokhov et al., 2008, 2009; Lazzari et al., 1997; Whitlock et al., 2002). В настоящее время существует несколько десятков такого рода систем, основанных на использовании различных физиологических и поведенческих показателей, но они всё ещё имеют ограниченную область применения.

Существующие в настоящий момент аппаратно-программные комплексы оценивают функциональное состояние, используя один из следующих методов: электроэнцефалографию (Belyavin et al., 1987), анализ сердечной активности (Egelund et al., 1982), движения головы (Heitmann et al., 2001), время реакции на стимул (Mabbott et al., 1999), электродермальную активность (Dorokhov et al., 1998), движения глаз (Ceder et al., 1977), моргания (Stern et al., 1994), измерение части времени, когда глаза закрыты (PERCLOS) (Dinges et al., 1998). Однако эффективность подобных систем пока невелика.

Наиболее перспективным методом мониторинга и контроля функциональных состояний в настоящий момент является метод видеорегистрации движений глаз

(видеотрекинг, ай-трекинг), поскольку данный метод является бесконтактным, обладает высоким разрешением по времени и, в конечном счёте, наиболее удобен для пользователя.

В настоящее время наблюдается рост числа исследований функциональных состояний с применением технологии видеотрекинга и интенсивная разработка аппаратуры контроля состояний на основе этой технологии.

Для поиска физиологических предикторов нарушения операторской деятельности существенным условием является наличие экспериментальных моделей, позволяющих количественно оценивать нарушения эффекторной операторской деятельности. В нашей лаборатории были разработаны различные модели операторской деятельности, позволяющие количественно оценивать изменения параметров движения глаз, вызванные нарушением деятельности при состояниях со сниженной работоспособностью: монотонией (Дорохов и др., 2011; Ткаченко, 2012) и утомлением (Пучкова, 2013). Проведение этих исследований показало неоднородность этих состояний, затрудняющую их количественную оценку по физиологическим показателям. Поэтому в нашем исследовании в качестве модельного состояния со сниженной работоспособностью была выбрана алкогольная интоксикация, которая позволяет более дозированно и однозначно изменять функциональное состояние оператора (Marple-Horvat et al., 2008). Эффективность такого подхода заключается в том, что появляется возможность сравнивать действия различных факторов, изменяющих функциональное состояние оператора, относительно состояний с разным уровнем алкогольной интоксикации. Примером такого рода исследований могут быть работы, в которых по показателям операторской деятельности показана корреляция между длительностью депривации сна и дозами алкоголя (Williamson A.M. et al. 2001).

Цель исследования

Целью данной работы являлось исследование изменений зрительно-моторных реакций под действием алкоголя на модели слежения за стационарными и движущимися объектами, а также выделение параметров окулomotorных реакций, потенциально пригодных для диагностики алкогольного опьянения и вызванных им нарушений операторской деятельности.

Задачи исследования

1. Разработать психомоторные тесты для моделирования различных видов операторской деятельности, требующих координированных движений глаз и руки и сопровождающихся разными типами движений глаз (саккады, прослеживающие движения глаз, фиксации взгляда и т.д.)
2. Оценить изменения параметров зрительно-моторных реакций под действием алкоголя на моделях статического появления / исчезновения стимула и непрерывного ведения цели.
3. Выявить показатели окуломоторных реакций, связанные со снижением эффективности выполняемой работы под действием алкоголя и потенциально пригодные для аппаратурной диагностики состояний со сниженной работоспособностью.

Научная новизна работы

1. Разработаны психомоторные тесты для моделирования различных видов операторской деятельности, требующих координированных движений глаз и руки. Разработана оригинальная методика комплексной оценки зрительно-моторных реакций для сложнокоординированной деятельности с высоким уровнем зрительного контроля.
2. Впервые проведена оценка межиндивидуальной вариабельности изменений зрительно-моторных реакций под действием алкоголя на трёх разных моделях операторской деятельности. Изменения зрительно-моторных реакций после приёма алкоголя сопоставлены с изменением эффективности операторской деятельности для всех использовавшихся методик.
3. Анализ указанных изменений позволил выбрать два показателя, которые достоверно и стабильно изменялись под действием алкоголя у большинства испытуемых. Эти показатели расцениваются нами как потенциально пригодные для аппаратурной диагностики состояния оператора: средняя мгновенная скорость саккад в ситуации статического появления / исчезновения стимулов (в качестве маркера изменения состояния оператора), и нарушение плавности траектории взгляда при прослеживании движущегося объекта (в качестве маркера нарушения операторской деятельности).

4. Предложен новый метод оценки кривизны траектории макросаккад и проведена оценка пригодности этого показателя для диагностики снижения работоспособности оператора под действием алкоголя.

Научно-теоретическое и практическое значение

Полученные результаты могут представлять интерес для понимания механизмов нарушения зрительно-моторной координации, вызываемых действием алкоголя. Разработанный нами методический инструментарий оценки межиндивидуальной вариабельности параметров зрительно-моторной координации может быть полезен для исследований механизмов возникновения состояний со сниженной работоспособностью. Полученные результаты относительно изменения геометрических характеристик (кривизны) макросаккад под действием алкоголя, ставят ряд вопросов, требующих дальнейших исследования и подробного анализа механизмов этого феномена.

Разработанный нами комплекс методов для исследования нарушений зрительно-моторной координации под действием алкоголя может быть полезен для выработки практических рекомендаций по нормативному регулированию допустимых доз алкоголя в крови водителей транспортных средств, а также в качестве дополнительного инструментария для разработчиков автоматизированных систем мониторинга и контроля состояния оператора. Практическое значение имеют, также, два окулографических маркера алкогольного опьянения, непосредственно выделенные нами в процессе исследования: маркер наличия алкоголя в организме и маркер наличия нарушений деятельности, вызванных влиянием алкоголя.

Положения, выносимые на защиту

1. Наиболее стабильными окуломоторными показателями изменения функционального состояния оператора под действием алкоголя являются:
 - средняя мгновенная скорость саккад в ситуации статического появления / исчезновения стимулов;
 - нарушение плавности прослеживания взглядом движущегося объекта (цели).Эти показатели могут быть рекомендованы для разработки аппаратурной диагностики состояния оператора.
2. Большинство окуломоторных параметров также весьма чувствительны к действию алкоголя, но они имеют высокий уровень межиндивидуальной

вариабельности и для диагностики нарушений деятельности или изменения функционального состояния непригодны.

Апробация работы

Отдельные результаты были доложены на российских и международных конференциях:

1. «Экспериментальная психология в России: традиции и перспективы». 2010, Москва.
2. 44th International Applied Military Psychology Symposium. 2008, St.Petersburg, Russia.
3. 16th European Conference on Eye Movements. 2011, Marseille, France.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 3 статьи в рецензируемых научных журналах из списка изданий, рекомендуемых ВАК, и одна статья в рецензируемом тематическом сборнике.

Структура и объём диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, обзора литературы, четырёх глав с изложением методов, результатов и их обсуждения, выводов и библиографического указателя. Работа изложена на 105 страницах, включает 24 рисунка и 4 таблицы. Список литературы включает в себя 110 источников, из них 30 – на русском языке и 80 – на иностранных языках.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ 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. Первый этап отбора проводился через Интернет и включал в себя информирование о процедуре исследования и первичный инструктаж (нормально выспаться, не употреблять алкоголь, кофе и медпрепараты в день эксперимента и накануне, пообедать за 2 часа до начала тестов). Участие в исследовании оплачивалось. Соответственно, 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 сокращённые версии тестовых заданий. Экспериментатор в это время проверял качество записи и калибровал аппаратуру).

Экспериментальная модель алкогольной интоксикации

Для создания экспериментальной модели алкогольной интоксикации 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 приёма алкоголя испытуемый в течение часа общался с экспериментатором на отвлечённые темы, и только потом начинался тест.

Регистрация физиологических показателей

Окуломоторные показатели

Основным физиологическим показателем в нашем исследовании были окуломоторные реакции испытуемых. Траектория перемещения взгляда регистрировалась при помощи системы бесконтактной видеорегистрации движений глаз (Eyegaze Analyzing System), использующей принцип отражения инфракрасного света от роговицы глаза (далее – «ай-трекер») с программным обеспечением NYAN 2 ® компании Interactive Minds. Запись велась в бинокулярном режиме попеременно двумя камерами, суммарная частота опроса – 120 Гц; расстояние до экрана – 60 см, экранное разрешение – 1280x1024 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.

Движения руки

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 движущиеся объекты (цель). Тесты предъявлялись в затемнённой камере на жидкокристаллическом мониторе Samsung с диагональю 17 дюймов (340x270мм, разрешение 1280x1024 пиксела) и легендировались как «стрельба по целям».

Тест «Статика»

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), границы и номер секторов на экран не выводились. В начале опыта в центре одного из секторов появлялась цель в форме круга диаметром 5 мм – испытуемый получал инструкцию максимально быстро навести на него курсор и щёлкнуть 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 курсора мыши и все щелчки записывались в лог-файл.

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.

Единицей пробой считалось предъявление одного стимула (т.е. все действия испытуемого с момента появления цели и до щелчка по цели мышью). Описанный алгоритм предъявления стимулов позволяет строить точные траектории движения взгляда и мыши для каждой пробы теста с учётом времени начала и конца предъявления каждого стимула.

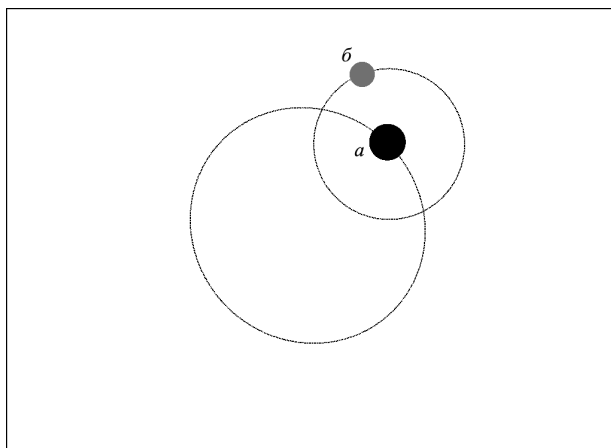


Рис. 2. Тесты «динамика», «динамика и дополнительный стимул»: траектории основной и дополнительной цели. а – основная цель, б – дополнительная цель. Обе цели движутся по часовой стрелке. При тестировании траектории не отображаются.

Тест «Динамика и дополнительный стимул»

В тесте «Динамика и дополнительный стимул» основная цель (зелёный 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 в секунду. Радиус отбиты дополнительной цели – 60 мм. Испытуемый получал инструкцию вести курсором мыши основную цель, стараясь не выходить за её пределы; при появлении дополнительной цели он должен был быстро навести на неё курсор и щёлкнуть мышью. В случае попадания дополнительная цель исчезала, а испытуемый должен был быстро вернуть курсор на основную цель и вести её дальше. Всего за тест предъявлялось порядка 70 дополнительных целей, паузы между предъявлениями варьировались в случайном порядке. Такой алгоритм позволяет строить и количественно оценивать траектории взгляда в процессе ведения цели, а также при поражении дополнительной цели.

Тест «Динамика» полностью аналогичен тесту «Динамика и дополнительный стимул», за исключением того, что при появлении дополнительной цели испытуемый получал инструкцию щёлкнуть по основной цели (по той, которую вёл); дополнительная цель здесь играла роль сигнала и исчезала после щелчка по основной цели. Также в тесте «Динамика» отличались размеры основной цели (её диаметр составлял 8мм); 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. Такой алгоритм позволяет строить и количественно оценивать траектории взгляда и моторику руки в процессе ведения цели, время реакции на дополнительный стимул, а также сравнивать время моторной и окуломоторной реакции в ситуации со сменой (тест «Динамика») и без смены целевого объекта (тест «Динамика и дополнительный стимул»).

Процедура исследования (схема эксперимента)

Процедура исследования включала в себя две серии опытов: контрольную и экспериментальную (рис. 3). 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).

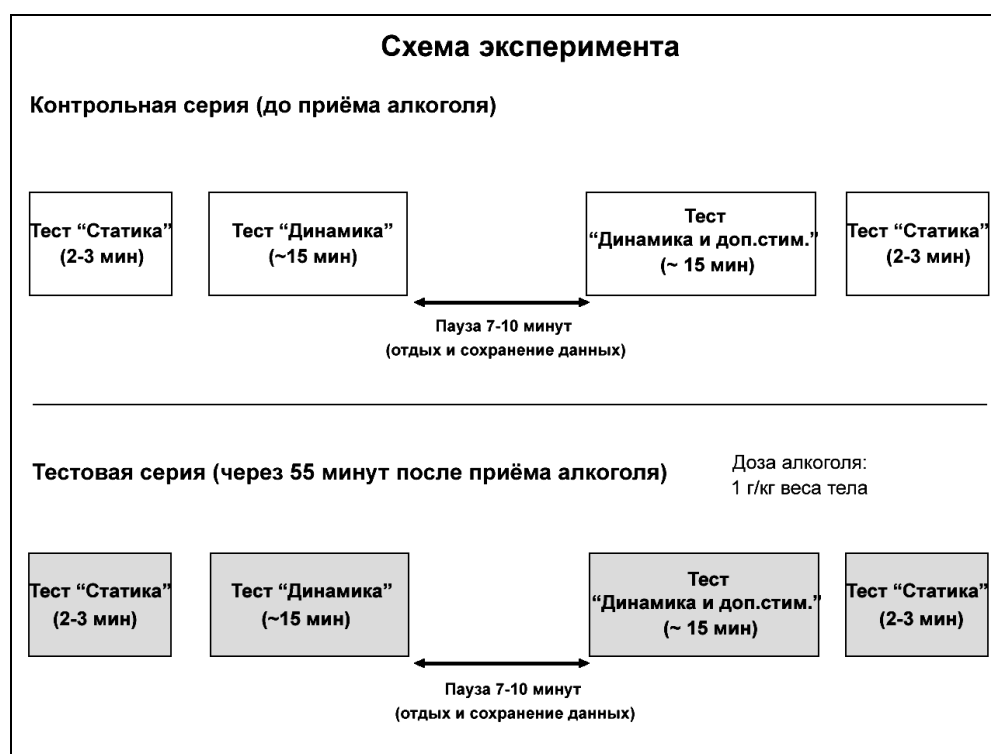


Рис. 3. Схема эксперимента.

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 – испытуемый переходил в другое помещение, там принимал алкоголь и в течение часа общался с экспериментатором на отвлечённые темы (пауза между контрольной и тестовой серией нужна, во-первых, чтобы дать алкоголю усвоиться и, во-вторых, чтобы избежать стимулирующего эффекта). Через час после приёма алкоголя проводился контрольный замер количества алкоголя в выдохе и начиналась тестовая серия опытов – полностью аналогичная контрольной.

Обработка данных

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 мгновенная скорость макросаккад
- показатели кривизны макросаккад
- показатели плавности прослеживания цели взглядом

Программное обеспечение

Помимо штатного программного обеспечения ай-трекера NYAN 2 ® компании Interactive Minds, нами были разработаны и использовались программы предъявления для тестов «Статика», «Динамика», «Динамика и дополнительный стимул», работающие в реальном времени.

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

- программы синхронизации лог-файлов ай-трекера и каждого из тестов
- программы визуализации для всех тестов
- программы детекции артефактов, в т.ч. аппаратурных
- программы полуавтоматического распознавания саккадических движений глаз
- программы оценки мгновенных скоростей взгляда и курсора мыши
- программы обработки параметров движения руки (время попадания в цель, латентность первого движения и т.д.) по лог-файлам программ предъявления
- программы обработки траекторий взгляда

Также производилась статистическая обработка данных с помощью пакета Statistica.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Статистический анализ параметров зрительно-моторных реакций

На рис. 4 представлены изменения параметров зрительно-моторных реакций под действием алкоголя для всех испытуемых в тесте «Статика». Латентность макросаккады, латентность моторной реакции (начала движения курсора мыши) и время попадания в цель достоверно увеличиваются. Достоверность этих изменений высока ($p=0,000001$). Однако в абсолютных цифрах разница в латентностях макросаккад до и после приёма алкоголя составляет в среднем порядка 15 мс.

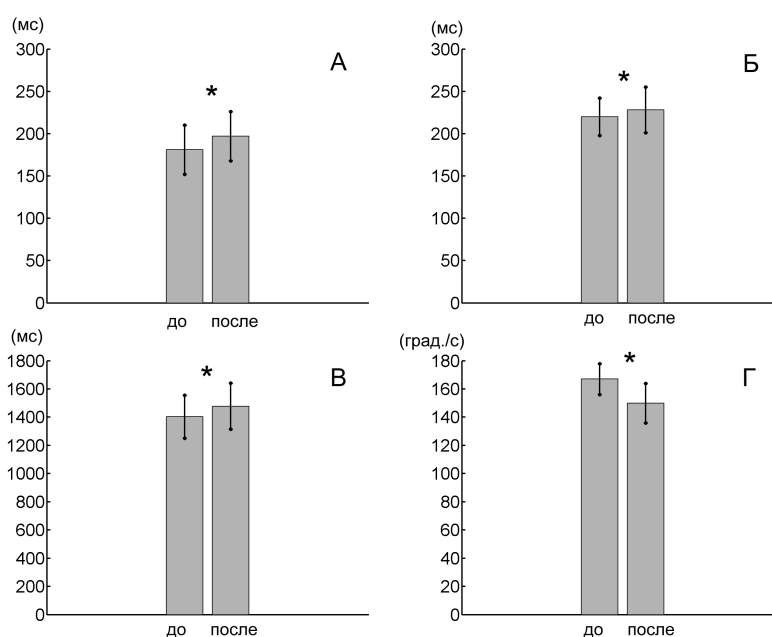


Рис. 4. Изменение параметров зрительно-моторных реакций под действием алкоголя для всех испытуемых (тест «Статика»). Достоверные изменения (Т-критерий Стьюдента для связанных выборок) отмечены звёздочкой, зоны погрешности - среднеквадратичное отклонение.

А – изменение латентности макросаккад ($p=0,000001$), Б – изменение латентности моторной реакции (первого движения мыши) ($p<0,02$), В – изменение времени попадания в цель ($p<0,004$), Г – изменение средней мгновенной скорости макросаккады ($p=0,000001$).

Другим интересным результатом является 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.

В тесте «Динамика и дополнительный стимул» направленность и достоверность изменений, аналогичны полученным в тесте «Статика»: латентность макросаккад, латентность моторных реакций (начала движения курсора к цели) и время попадания в цель достоверно увеличиваются.

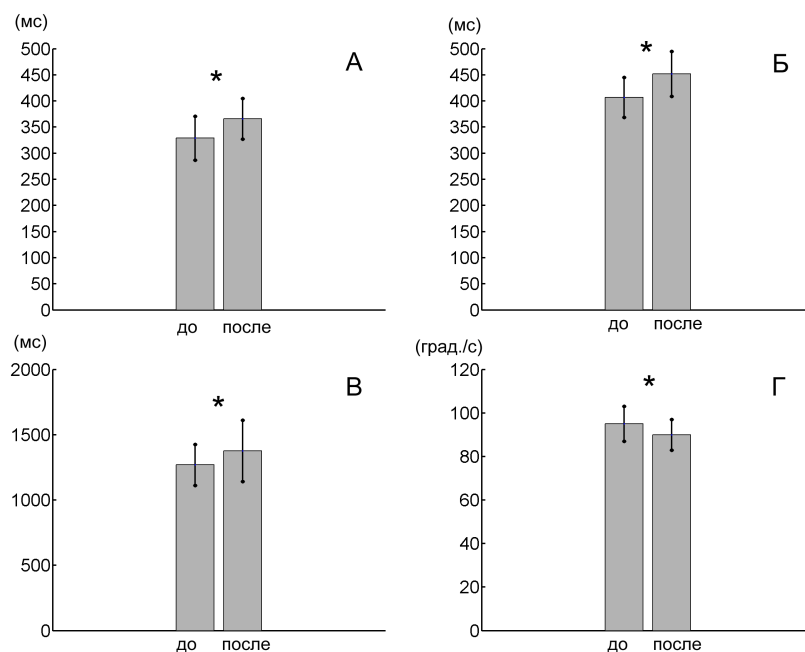


Рис. 5. Изменение параметров зрительно-моторных реакций под действием алкоголя для всех испытуемых (тест «Динамика и дополнительный стимул»). Достоверные изменения (Т-критерий Стьюдента для связанных выборок) отмечены звёздочкой, зоны погрешности - среднеквадратичное отклонение.

А – изменение латентности макросаккад ($p=0,000027$), Б – изменение латентности моторной реакции (первого движения мыши) ($p=0,000035$), В – изменение времени попадания в цель ($p=0,01023$), Г – изменение средней мгновенной скорости макросаккады ($p=0,000739$).

Латентность макросаккад и моторной реакции увеличивается в среднем на 37 и 45 миллисекунд соответственно. Время попадания в цель (щелчка по цели мышью) увеличивается в среднем на 107 миллисекунд. А средняя мгновенная скорость, наоборот, с высокой достоверностью снижается (рис.5).

В тесте «Динамика» статистическими методами оценивался только один показатель – время попадания в цель (рис. 6). Как видим, после приёма алкоголя время реакции (время попадания в цель) в этом тесте увеличивается, достоверность изменений при этом чрезвычайно высока.

Примечание: цветом указано направление изменений для $p < 0.05$ (светло-серая заливка – показатель достоверно увеличивается, тёмно-серая – достоверно уменьшается, белая – изменения недостоверны). Числа в ячейках – уровень достоверности ($p =$).

ЛС – латентность макросаккад, ЛМ – латентность моторной реакции, ВР – время реакции (попадания в цель), СС – средняя мгновенная скорость макросаккад.

Анализ плавности траектории прослеживания

Для оценки плавности прослеживания цели взглядом анализировались траектории перемещения взгляда из теста «Динамика». Особенности траекторий прослеживания отчётливо видны при визуализации (рис. 7): в контрольном опыте (рис. 7-А) взгляд ведёт цель относительно плавно; рывков и длительных фиксаций почти нет; возможны небольшие отклонения от траектории цели (обычно не больше 1-1,5 угловых градусов). После приёма алкоголя (рис. 7-Б) траектория перестаёт 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. В результате получаем сглаженную траекторию взгляда – аппроксимирующую кривую.
2. Вычисляем расстояние в пикселях между каждой точкой реальной (несглаженной) траектории взгляда и соответствующей ей точкой сглаженной траектории. Получаем последовательность отклонений для каждой точки траектории от аппроксимирующей кривой.
3. Полученную последовательность отклонений используем для статистического анализа.

Идея данного алгоритма заключается в том, что при дефиците прослеживания среднее отклонение от аппроксимирующей кривой должно увеличиться. Если после приёма алкоголя траектория действительно становится менее плавной, а количество данных одинаково – в этом случае мы увидим чёткие различия на гистограмме отклонений.

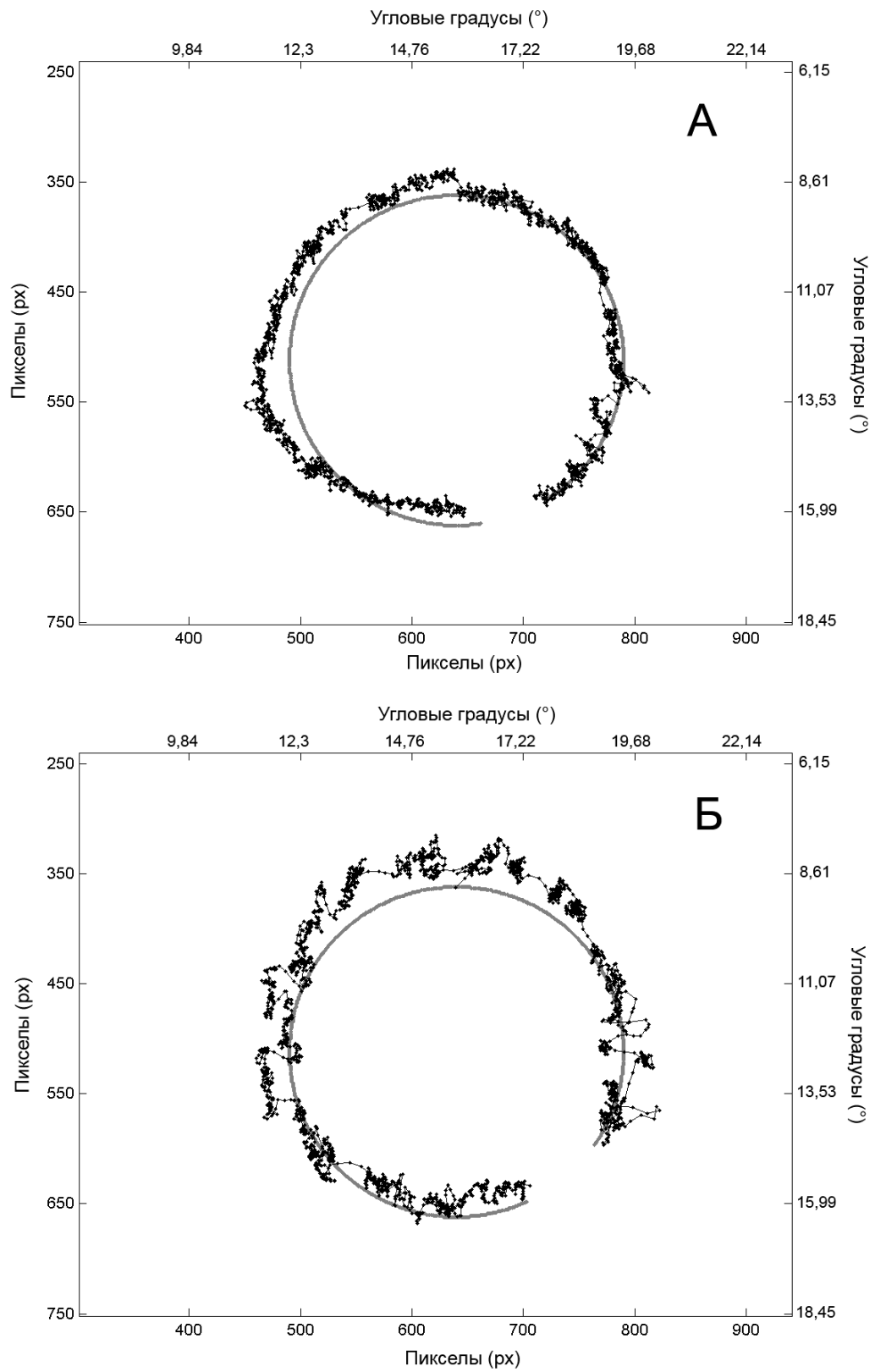


Рис. 7. Изменение характера прослеживания цели взглядом после приёма алкоголя.

Испытуемый № 20, интервал с 59 по 66 секунду опыта. Серая траектория – траектория цели, чёрная – траектория взгляда. А – прослеживание цели до приёма алкоголя, Б – после приёма алкоголя.

На рисунке 8-А мы видим типичную форму распределения отклонений реальной траектории от аппроксимирующей кривой (15 испытуемых из 22). После приёма 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 полой. Указанные изменения характерны для испытуемых, у которых после приёма алкоголя отмечается дефицит прослеживания.

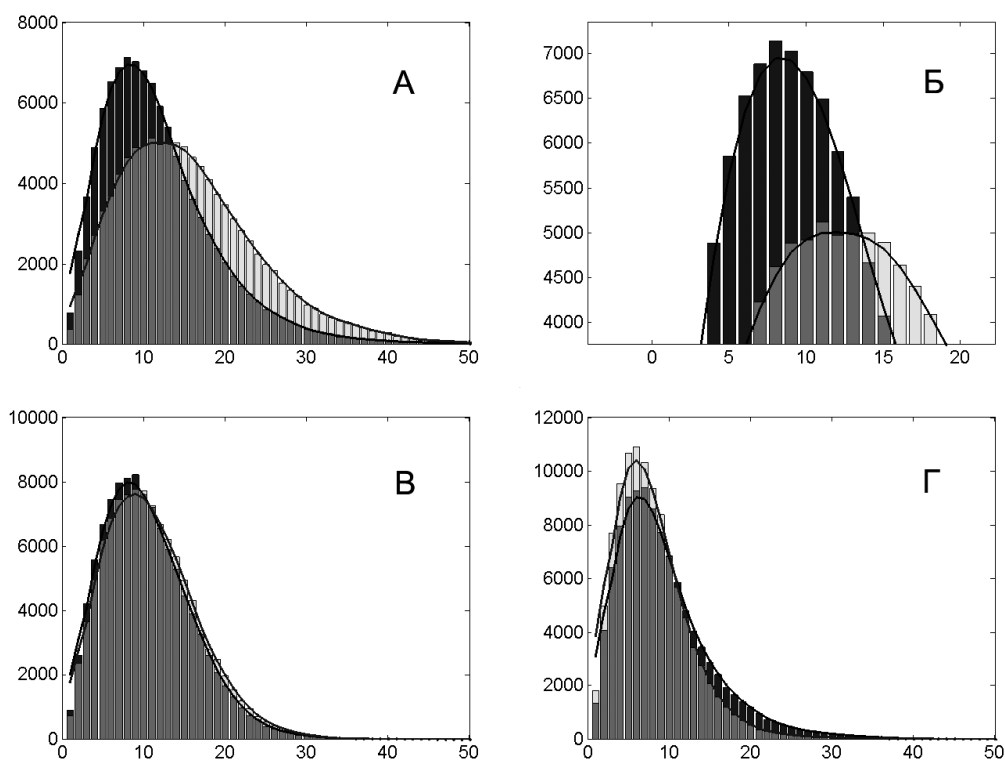


Рис. 8. Изменение отклонений реальной траектории от аппроксимирующей кривой под действием алкоголя.

Тёмно-серая гистограмма – до приёма алкоголя, светло-серая гистограмма – после приёма 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 рисунке 8-В и 8-Г представлены нетипичные формы распределения отклонений: в одном случае (рис. 8-В) распределение практически не изменяется (а значит не изменяется и плавность прослеживания цели), в другом случае (рис. 8-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 приёма алкоголя изменяется амплитуда моды распределения. Соответственно, при количественном анализе плавности прослеживания цели взглядом в качестве основного показателя мы использовали нормированную амплитуду моды. Вычисляли её следующим образом: сначала сглаживали вариационный ряд методом простого скользящего среднего с периодом 3; сглаживание проводили в два этапа: сначала от начала к концу вариационного ряда, затем от конца к началу. Такой подход позволяет получить качественное сглаживание и избежать смещения фазы (рис. 8-Б). По сглаженной кривой находили моду и амплитуду моды до и после приёма алкоголя. Полученную амплитуду моды нормировали, разделив на количество отсчётов (строк с данными) в опыте.

Затем выполнялось сравнение нормированной амплитуды моды до и после приёма алкоголя для всех испытуемых выборки с помощью теста знаков и теста связанных пар Вилкоксона (рис. 9). После приёма алкоголя нормированная амплитуда моды (а значит и степень плавности траектории взгляда) с высокой достоверностью снижается ($p=0,001384$ для теста знаков, $p=0,003302$ для теста связанных пар Вилкоксона). Таким образом, после приёма алкоголя типичным для выборки является уменьшение плавности прослеживания цели взглядом.

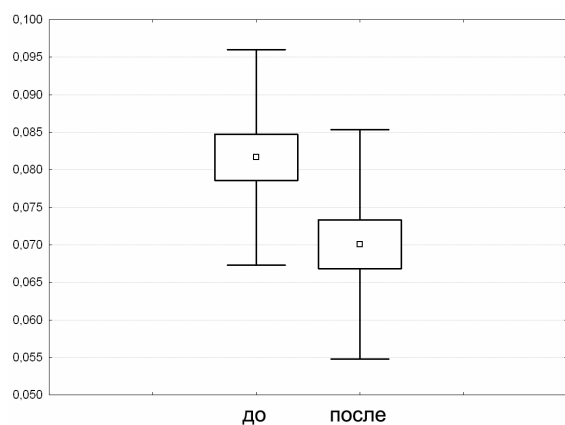


Рис. 9. Изменение нормированной амплитуды моды (плавности прослеживания) под действием алкоголя для всей выборки.

По оси Y – нормированная амплитуда моды. Центральная точка – среднее, квадрат – стандартная ошибка, зоны погрешности – среднеквадратичное отклонение.

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

1. Вычислялась матрица разности для нормированной амплитуды моды до и после приёма алкоголя (для каждого испытуемого из нормированной амплитуды моды после приёма алкоголя вычитаем нормированную амплитуду моды до алкоголя).
2. Вычислялась матрица разности для времени реакции до и после приёма алкоголя (аналогично, для каждого испытуемого из среднего времени реакции после приёма алкоголя вычитаем среднее время реакции до алкоголя).
3. Полученные матрицы разности использовались для построения диаграммы рассеяния (рис.10).
4. Диаграмма рассеяния сопоставлялась с результатами статистического анализа.

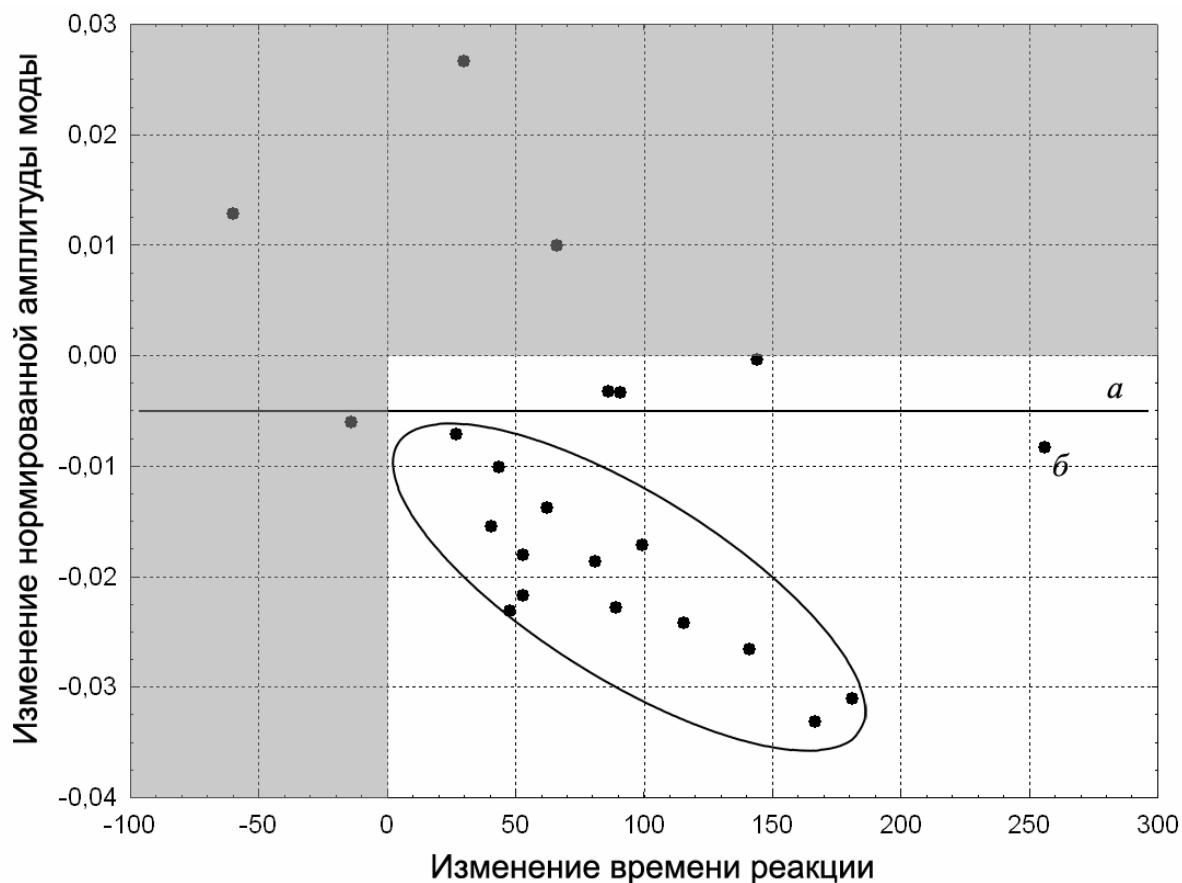


Рис. 10. Изменение плавности прослеживания и времени реакции под действием алкоголя.

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

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 даёт практически одинаковый результат:

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

Изменения указанных параметров во всех тестах имеют высокую, а иногда – очень высокую достоверность. Однако при рассмотрении результатов отдельных испытуемых (таблица 1) легко заметить, что только один из исследованных параметров изменяется относительно стабильно и с высокой амплитудой – это средняя мгновенная скорость макросаккад в тесте «Статика» (модель дискретного появления / исчезновения стимула). 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 патологиях указывают на неспецифический характер этого явления. В нашем исследовании мы рассматривали дефицит прослеживания (во всех его

проявлениях) как потенциальный маркер абнормального состояния, вызванного алкоголем, или маркер наличия нарушений в деятельности. Соответственно, 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 вёл курсором мыши. Соответственно, время попадания в цель в этом тесте – это время простой сенсомоторной реакции; оно является показателем эффективности работы оператора. Сопоставим изменение времени реакции (времени попадания в цель) с изменениями плавности прослеживания цели взглядом (рис. 10).

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 приёма алкоголя – нетипичная реакция для данной выборки. Аналогично, нетипичным является уменьшение среднего времени реакции после приёма алкоголя ($p=0,000014$, Т-критерий Стьюдента для связанных выборок). Отметив области нетипичных реакций серым цветом (рис. 10), видим, что в эти области попадают результаты 4 испытуемых. В оставшейся области (без заливки) хорошо видна группа точек с чрезвычайно высокой линейной корреляцией (рис. 10, овал) и группа из 4 точек, которые не коррелируют с остальными. У всех «нескоррелированных» точек изменение амплитуды моды лежит в диапазоне от 0 до $-0,01$. Полученные результаты интерпретируются нами следующим образом:

- Испытуемые, у которых после приёма 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. 10 эти испытуемые находятся в зоне с серой заливкой.
- Испытуемые, на которых алкоголь подействовал слабо, демонстрируют стандартные, но слабо выраженные физиологические реакции: плавность прослеживания (амплитуда моды) у них уменьшается незначительно (от 0 до $-0,01$). При этом часть испытуемых сохраняет способность адекватно выполнять простую операторскую работу, поэтому чётко выраженной зависимости между изменением

плавности прослеживания (амплитуды моды) и изменением времени реакции нет. На рис. 10 это группа точек в области без заливки в диапазоне изменения амплитуды моды от 0 до -0,01.

- Испытуемые, на которых алкоголь подействовал сильно, демонстрируют чёткую линейную зависимость между изменением амплитуды моды (плавности прослеживания) и изменением времени реакции (качества операторской работы). На рис. 10 это группа точек с высокой корреляцией и амплитудой моды от (-0,01) и ниже.

Остановимся подробнее на группе испытуемых, на которых алкоголь подействовал слабо. Диапазон амплитуды моды от 0 до -0,01, по сути, является пороговой областью, ниже которой изменение амплитуды моды (плавности прослеживания) начинает чётко коррелировать с изменением времени реакции (эффективности операторской работы).

Задача точного вычисления порога, ниже которого начинается указанная корреляция, в принципе, может быть решена за счёт увеличения числа экспериментов. В нашем случае мы исключаем результаты одного испытуемого, которые являются явным статистическим выбросом (рис. 10, *b*) и получаем порог изменения амплитуды моды, равный -0,005, ниже которого остаются только скоррелированные результаты (рис. 10, *a*). Теперь мы можем вычислить коэффициенты корреляции для группы испытуемых, у которых показатели изменения плавности прослеживания и эффективности операторской работы чётко скоррелированы (рис. 10, 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. Интересно что на полученную линейную зависимость практически не влияет межиндивидуальная вариабельность реакций: изменения плавности прослеживания жёстко коррелируют с изменением времени реакции вне зависимости от индивидуальной скорости реакции и плавности прослеживания, которые были зарегистрированы у испытуемых в контрольной серии опытов (до приёма алкоголя).

Таким образом, результаты анализа изменений плавности прослеживания цели взглядом не позволяют использовать плавность прослеживания в качестве маркера изменения функционального состояния (у 7 испытуемых из 22 плавность прослеживания изменяется или крайне слабо, или нетипичным для выборки образом). В то же время жёсткая линейная корреляция между изменением плавности прослеживания и изменением времени реакции позволяет однозначно интерпретировать изменение плавности прослеживания как маркер нарушения деятельности. Иными словами, дефицит

прослеживания указывает не на сам факт наличия некого поражающего фактора, а на то, что под влиянием этого поражающего фактора уже произошли нарушения деятельности.

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: латентность макросаккад увеличивается, латентность моторной реакции увеличивается, средняя мгновенная скорость макросаккад уменьшается, время реакции (попадания в цель) увеличивается. Указанные изменения имеют высокую достоверность.
2. После приёма 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 в ситуациях, когда испытуемый уже неадекватен.
4. Линейная зависимость между эффективностью операторской работы конкретного испытуемого и количеством алкоголя в крови отсутствует. Зависимость между изменением эффективности операторской работы после приёма 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.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**Статьи**

1. Захарченко Д.В., Дорохов В.Б. Изменение отдельных параметров зрительно-моторных реакций под действием алкоголя. // Экспериментальная психология. - 2012. - Т.5. - №2. - С.5-21.
2. Дорохов В.Б., Свидерская Н.Е., Захарченко Д.В., Антонов А.Г. Сравнительный анализ влияния этанола на пространственную организацию биопотенциалов при открытых или закрытых глазах и при конвергентном и дивергентном типах мышления. // Журнал высшей нервной деятельности. - 2011. - Т.61. - №2. - С.170-179.
3. Дорохов В.Б., Арсеньев Г.Н., Ткаченко О.Н., Захарченко Д.В., Лаврова Т.П., Дементиенко В.В. Психомоторный тест для исследования зрительно-моторной координации при выполнении монотонной деятельности по прослеживанию цели. // Журнал высшей нервной деятельности. - 2011. - Т.61.- №4. - С.476-484.

Сборники

1. Захарченко Д.В., Дорохов В.Б. Окуломоторные паттерны, возникающие при выполнении операторской работы в условиях алкогольной интоксикации. // Экспериментальная психология в России: традиции и перспективы. - М.: Институт психологии РАН. - 2010. - С.496-501.

Тезисы конференций

1. Dorokhov V.B., Arsenyev G.N., Zakharchenko D.V., Ukrainitseva Y.V., Lavrova T.P., Dementienko V.V. Eye–hand coordination: Performance errors and vigilance level // International Journal of Psychophysiology. – 2008. – Т. 69. – №. 3. – С. 266.
2. Дорохов В.Б., Арсеньев Г.Н., Захарченко Д.В., Лаврова Т.П., Ткаченко О.Н., Пучкова А.Н., Дементиенко В.В. Методика экспресс-диагностики сниженной работоспособности по характеристикам зрительно-моторной координации. - Четвертая международная конференция по когнитивной науке. Тезисы докладов –Томск. – 2010. – Т.1. – С.241.
3. Дорохов В.Б., Арсеньев Г.Н., Захарченко Д.В., Лаврова Т.П., Ткаченко О.Н., Дементиенко В.В., Шахнарович В.М. Нарушения зрительно-моторной координации, вызываемые снижением уровня бодрствования при выполнении монотонной

- деятельности по прослеживанию цели. // Материалы 15-й Международной конференции по нейрокибернетике. – Ростов- на –Дону. - 2009. - Т.1. - С. 202-203.
4. Арсеньев Г.Н., Захарченко Д.В., Лаврова Т.П., Ткаченко О.Н., Дементенко В.В., Шахнарович В.М., Дорохов В.Б. Нарушения зрительно-моторной координации, тестируемые дополнительным стимулом при сниженном уровне бодрствования. // Материалы 5-ой Школы конференции «Сон-окно в мир бодрствования». - 2009. - С. 93.
 5. Дорохов В.Б., Лаврова Т.М., Украинцева Ю.В., Захарченко Д.В., Пинтелина Н.А., Горбунов К.С., Дементенко В.В., Герус С.В., Марков А.Г., Шахнарович В.М. Монотония как экспериментальная модель засыпания. - Материалы IV съезда Российского психологического общества. - Ростов-на-Дону. - 2007. - Т.1. - С. 328.
 6. Dorokhov V.B., Arsenyev G.N., Tkachenko O.N., Zakharchenko D.V., Dementienko V.V. Eye-hand coordination errors during monotonous activity // 15th European Conference on Eye Movements. Southampton. UK. – 2009. – С. 159.
 7. Dorokhov V.B., Arsenyev G.N., Zakharchenko D.V., Ukraintseva J.V., Lavrova T.P., Dementienko V.V., Markov A.G., Shakhnarovich V.M. Monotony and eye-hand coordination during tracking performance. Abstracts of the 44th International Applied Military Psychology Symposium. - St. Petersburg. – 2008. P.53-54.