

Психофизиологические предикторы качества управления симулятором вождения автомобиля на фоне хронической депривации сна*

О.Н. Ткаченко, В.Б. Дорохов, В.В. Дементиев, Е.О. Гандина,
Г.Н. Арсеньев, А.О. Таранов, А.Н. Пучкова, Д.С. Свешников

Исследовался декремент бдительности водителей во время управления симулятором вождения автомобиля. Проведена оценка психофизиологических предикторов декремента бдительности, а также проверка двух неинвазивных техник снижения сонливости на фоне хронической депривации сна: вибромассажной накладки на кресло и эфирного масла мяты перечной.

В исследовании проведены эксперименты с симулятором вождения автомобиля на 18 здоровых испытуемых с частичной депривацией сна. Регистрировались видеозапись лица испытуемого, электроэнцефалограмма (ЭЭГ), электрокардиограмма (ЭКГ) и кожно-гальваническая реакция (КГР). Испытуемые протестированы на сонливость, общее самочувствие и время реакции.

Установлено, что испытуемые, которые находились в состоянии хронической депривации сна и хронического стресса, в среднем допускали 2.2 (от 0 до 7) ошибки за эксперимент. При этом около 20% ошибок испытуемых, по оценкам экспертов, вызвано отвлечением, а не засыпанием. Сделаны выводы о зависимости уровня внимания и сонливости от нескольких факторов и необходимости дальнейших исследований. На основании экспериментальных данных разработан список рекомендаций для конструирования систем мониторинга состояний водителя.

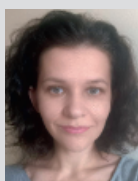
Ключевые слова: водители, частично автоматизированное вождение, ЭКГ, ЭЭГ, КГР, видеотрекинг, операторская деятельность, декремент бдительности.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №19-29-06071).

Введение

В результате революции в производительности компьютеров появилась возможность внедрять многие техники так называемого машинного

обучения в повседневную жизнь, всё больше автоматизируя рутинные процедуры, которые раньше требовали участия человека. Так возникла и концепция «умного города», в котором многие инфраструктурные процессы находятся под частичным или полным управлением высокоавтоматизированных систем. Одной из областей инфраструктуры, ко-



ТКАЧЕНКО
Ольга Николаевна
Институт высшей деятельности и нейрофизиологии РАН



ДОРОХОВ
Владимир Борисович
профессор,
Институт высшей деятельности и нейрофизиологии РАН



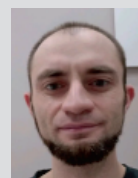
ДЕМЕНТИЕНКО
Валерий Васильевич
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН



ГАНДИНА
Евгения Олеговна
Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН



АРСЕНЬЕВ
Глеб Николаевич
Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН



ТАРАНОВ
Антон Олегович
Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН



ПУЧКОВА
Александра Николаевна
Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН



СВЕШНИКОВ
Дмитрий Сергеевич
Медицинский институт, Российский университет дружбы народов

торая уже сейчас может быть частично автоматизирована, является автомобильный трафик.

По данным Всемирной организации здравоохранения, аварийность на дорогах приводит к гибели около 1.3 млн людей в год, а травмы и ранения в дорожно-транспортных происшествиях (ДТП) получают 20–50 млн человек ежегодно [1]. Человеческий фактор является основной причиной аварий приблизительно в 90% случаев, причем приблизительно в 20–25% аварию вызывает засыпание за рулем, а еще в 20% – отвлечение от вождения, например, на мобильные телефоны [2, 3]. Самый интенсивный автомобильный трафик наблюдается в мегаполисах, жители которых страдают от светового загрязнения, хронической депривации сна и высокого уровня стресса. Так, согласно исследованию, проведенному компанией *Amazfit* в 2021 г. на 2.9 млн респондентов [4], средняя продолжительность сна жителей России составляет менее 7 часов в сутки, причем Москва и Московская область входят в тройку худших по этому показателю регионов. Согласно некоторым исследованиям, ограничение сна до 6 часов в сутки повышает риск заснуть за рулем в 2.6 раза, а менее четырех часов сна перед вождением – в 15 раз [5].

По данным *Euromonitor International* [6], в 2023 г. ожидается рост продаж частично автоматизированных автомобилей, которые берут на себя управление в рутинных ситуациях, на 216% по сравнению с 2022 г. Показано, что внимательность в полуавтоматических транспортных средствах снижается быстрее по сравнению с полностью ручным управлением, а сонливость нарастает в течение 20–30 минут [7, 8].

Физиологические механизмы монотонии, снижения внимания и засыпания при возникновении эффекта декремента бдительности человека до сих пор исследованы недостаточно [9]. Несмотря на множество исследований и значительное число патентов в этой сфере, большинство исследований внимания и сонливости ограничивается изучением одного-двух психофизиологических показателей, а длительность исследования чаще всего составляет один час и менее. Критерии оценки уровня внимания или сонливости также значительно различаются, что не позволяет составить комплексную картину состояния водителя.

Исследование литературы о борьбе с эффектами монотонии [10] показывает, что для улучшения уровня внимания и качества монотонной деятельности могут быть применены различные способы, в том числе вибромассажные накладки на кресло [11] или распыление эфирных масел, в частности, мятного [12].

Целью нашего исследования было изучить возможности контроля внимания и сонливости водителя высокоавтоматизированных транспортных средств в модельных условиях, приближенных к условиям «умного города», по психофизиологическим показателям, а также выяснить эффективность двух неинвазивных способов снижения сонливости и улучшения качества вождения.

Задачами исследования были:

– оценка возможности предсказания качества управления симулятором вождения автомобиля по предшествую-

щему тестированию на время сенсорной реакции, времени сна в ночь перед экспериментом и субъективной оценке состояния;

– проверка эффективности воздействия массажной вибронатки и распыления мятного масла посредством ароматизатора для повышения качества управления симулятором вождения автомобиля;

– выработка рекомендаций для конструирования систем мониторинга состояний водителя.

Методика

Симулятор управления автомобилем

Компьютерный симулятор вождения автомобиля (далее «симулятор») представлял собой комбинацию компьютера (диагональ монитора 17 дюймов), компьютерного кресла с подголовником и игрового руля с педалями. Изображение на мониторе представляло собой стилизованный вид на четырехполосную дорогу, разделенную пунктирной разметкой. В отсутствие стимулов «автомобиль» не требовал управления от испытуемого и двигался по центру второй справа полосы со скоростью 60 км/ч. Испытуемый получал управление только в промежутки времени, когда от него требовалась реакция на событие.

Время между событиями случайным образом варьировало от 3 до 7 мин, в среднем – 5 мин, распределение времен на этом промежутке – равномерное. Последовательность событий в начале каждой экспериментальной сессии задавалась случайным образом.

В ходе движения могли происходить следующие события (по 9 событий каждого типа в одной экспериментальной сессии):

– событие 1: постепенное покраснение одной полосы дороги, испытуемый должен был свернуть на соседнюю полосу;

– событие 2: появление перед автомобилем неподвижного препятствия в виде стилизованной фигурки пешехода на расстоянии 30 м; испытуемый должен был затормозить.

Испытуемые

Для исследования были выбраны студенты в возрасте 18–22 года без диагностированных проблем со зрением, острых или хронических заболеваний, с небольшим или отсутствующим стажем вождения (до 4 лет). Согласно метаобзору [13], чем старше водитель и больше стаж вождения, тем он в среднем менее уязвим для сонливости, поэтому на молодых водителях эффект должен был проявиться более отчетливо.

Процедура эксперимента

Каждый испытуемый принял участие в четырех экспериментах:

1. Эксперимент типа 0, без депривации сна: обучающая сессия в симуляторе, регистрация фоновых показателей, длительность – 15 минут.
2. Эксперимент типа 1, с депривацией сна: не более 4 часов сна в ночь перед экспериментом, длительность – 90 мин.
3. Эксперимент типа 2, с депривацией сна: не более 4 часов сна в ночь перед экспериментом и активация массажной вибронакидки на кресло раз в 10 минут, длительность – 90 мин.
4. Эксперимент типа 3, с депривацией сна: не более 4 часов сна в ночь перед экспериментом и включение аромадиффузора с маслом мяты перечной раз в 10 минут, длительность – 90 мин.

Эксперименты проводили в дневное время, с 13 до 16 часов, чтобы сессия в симуляторе приходилась на время наивысшей дневной сонливости. До и после эксперимента они заполняли опросник «САН» (самочувствие – активность – настроение). Кроме того, перед экспериментом тестировали время реакции испытуемого на простые и усложненные неправильными подсказками стимулы на аппаратно-программном комплексе УПДК-МК (производство АО «Нейроком») [1]. Время сна в ночь перед экспериментом оценивалось экспертом по показаниям актиграфов производства компании Condor Instruments.

Во время эксперимента регистрировали: ЭЭГ от 19 отведений по стандартной схеме 10–20, ЭКГ и кожно-

гальваническую реакцию (КГР) от монополярных отведений. Также на мониторе была закреплена видеокамера, отслеживающая положение головы, моргания и закрытие глаз испытуемым на протяжении эксперимента. Данные с симулятора вождения содержали координаты автомобиля, скорость, ускорение, угол поворота руля и информацию о событиях.

До и после каждого эксперимента регистрировали фоновые физиологические показатели: две минуты в положении сидя с открытыми глазами и две – с закрытыми глазами.

Вычисление показателей сонливости из физиологических данных

Предварительная обработка и анализ данных проводились в программно-вычислительной среде Python Anaconda.

Вычисление индекса закрытия глаз PERCLOS. Видеоизображение лица испытуемого анализировалось покадрово с применением стандартной библиотеки компьютерного зрения OpenCV. Закрытием глаз считались промежутки времени, когда расстояние между веками составляло менее $\frac{1}{4}$ от медианного значения, включая как моргания, так и длительные закрытия глаз. Показатель PERCLOS вычислялся как доля времени с закрытыми глазами на протяжении предыдущей минуты.

Для ЭЭГ вычислялись спектральные характеристики в нескольких диапазонах частот.

Для вариабельности сердечного ритма (BCR) проводился спектральный анализ расстояний между сокращениями сердца и вычислялся показатель соотношения низких и высоких частот (0.04–0.15 Гц и 0.15–0.5 Гц), который отражает тонус симпатической нервной системы.

Для КГР вычислялись промежутки между соседними моментами микровыбросов пота потовыми железами, что отражается в сигнале кратковременным скачком сопротивления кожи (так называемая фазическая компонента КГР). Согласно стандартам, разработанным АО «Нейроком» и утвержденным для машинистов поездов, в бодрствовании промежутки между соседними фазическими компонентами должен составлять не более 60 секунд. Удлинение интервала свидетельствует о декремента бдительности и нарастающей сонливости.

Результаты

В соответствии с задачами исследования нами получена оценка возможности предсказания качества управления симулятором вождения автомобиля по предшествующему тестированию на время сенсомоторной реакции, по времени сна в ночь перед экспериментом и субъективной оценке состояния. Проверена также эффективность воздействия массажной вибронакидки и распыления мятного масла посредством аромадиффузора для повышения качества управления симулятором вождения автомобиля.

Ошибки, связанные с засыпанием и отвлечением

В среднем испытуемые совершали 2.22 ± 2.10 ошибки за 1.5 часа эксперимента (от 0 до 7). При этом в экспериментах

без дополнительных воздействий испытуемые совершали в среднем 1.95 ошибки, в экспериментах с вибронакидкой – 2.50 ± 2.18 ошибки, с мятым маслом – 2.55 ± 1.98 ошибки (табл. 1). Различия не достигли уровня статистической значимости из-за большого разброса, но ни вибромассажная накидка, ни распыление мятого масла в среднем не улучшили эффективность управления симулятором вождения автомобилем.

Эксперты оценивали физиологические показатели испытуемых и видеозапись лица испытуемого за 15 с до ошибок. В 22% случаев физиологические показатели не свидетельствовали о засыпании, то есть предположительно были вызваны отвлечением.

В таблице 1 приведены количество ошибок в симуляторе вождения автомобиля и показатели реакции на два типа событий в зависимости от типа воздействия в эксперименте. Звездочками отмечены статистически значимые отличия. Времена реакции на два типа событий не коррелировали между собой.

С количеством ошибок в симуляторе вождения автомобиля положительно коррелировало среднее время реакции на плавно появляющееся препятствие ($r=0.71$, $p<0.001$). Значимая корреляция сохранялась и при анализе опытов с разными типами воздействия по отдельности (без воздействия $r=0.67$, $p<0.05$; вибронакидка – $r=0.75$, $p<0.01$; мятое масло – $r=0.88$, $p<0.001$). Можно предположить, что ошибки при появлении быстрого препятствия были в большой степени обусловлены замедлением времени реакции.

Опросник САН (Самочувствие, Активность, Настроение)

До и после эксперимента испытуемые проходили опросник из 30 вопросов, по которому оценивались их самочувствие, активность и настроение. Баллы по шкале Самочувствия положительно коррелировала с баллами по шкале Настроения ($r=0.76$, $p<0.001$ до эксперимента; $r=0.77$, $p<0.001$ после эксперимента), и отрицательно – с баллами по

шкале Активность ($r=-0.74$, $p<0.001$ до опыта; $r=-0.89$, $p<0.001$), то есть чем более активны были испытуемые, тем хуже они себя чувствовали и оценивали свое настроение. Вместе со сниженными средними баллами по всем шкалам (менее 4) такая динамика характерна для хронического стресса и активации организма за счет повышенной активности симпатической нервной системы.

Оценка сонливости и время сна

Перед короткими экспериментами без депривации сна время сна испытуемых составило в среднем 407 ± 23 мин (от 5 до 8 часов, в среднем около 6.7 ч). В экспериментах с депривацией сна, где от испытуемых требовалось проспать четыре часа – 255 ± 10 минут (без воздействия), 246 ± 14 мин (вибронакидка), 241 ± 13 мин (мятое масло).

Перед началом эксперимента испытуемые оценивали свою сонливость по шкале от 1 до 7. В контрольных экспериментах без депривации сна среднее составило 4.2 ± 1.3 , в экспериментах с депривацией и без воздействия – 5.23 ± 2.49 ; в экспериментах с вибронакидкой – 5.56 ± 2.42 ; в экспериментах с мятым маслом – 5.39 ± 1.40 . Таким образом, перед экспериментами с регистрацией фона испытуемые спали недостаточно и демонстрировали высокую сонливость.

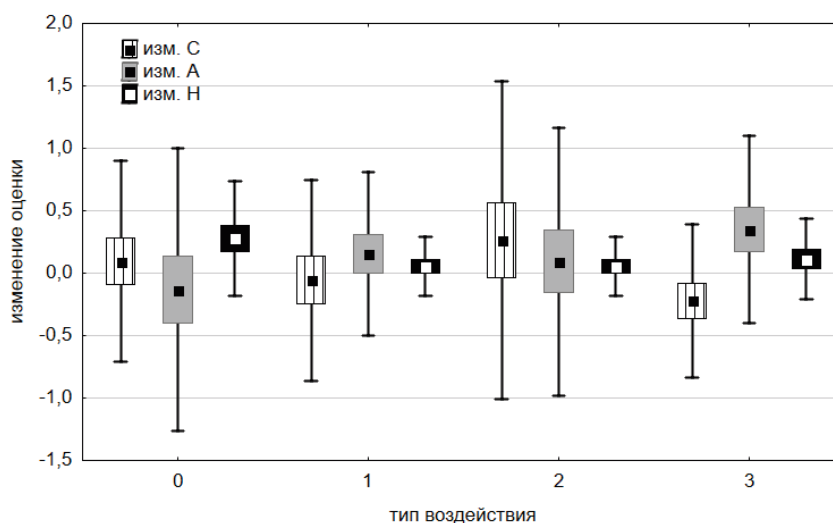


Рис. 1. Разность шкал Самочувствия (С), Активности (А) и Настроения опросника САН после эксперимента и до эксперимента. По оси X приведены типы эксперимента: 0 – 15-минутная тренировочная сессия; 1 – с депривацией сна, 2 – с депривацией сна и воздействием вибромассажной накидки; 3 – с депривацией сна и воздействием мятого масла.

Таблица 1. Ошибки и времена реакции на события в экспериментах

Параметр	Событие в эксперименте					
	без воздействия		вибронакидка		мятное масло	
	среднее	станд. откл.	среднее	станд. откл.	среднее	станд. откл.
Количество ошибок	1.95	1.10	2.42	2.18	2.55	1.98
Время реакции на покраснение дороги, с	2.38	0.83	2.65	1.04	3.08	1.36
Дистанция остановки перед пешеходом, м	1.60	0.31	2.21*	1.10	2.30*	1.56

* Статистически значимые отличия от первого эксперимента без воздействия, $p < 0.01$.

Таблица 2. Изменения индекса вариабельности сердечного ритма (значения средних и стандартных ошибок)

Время измерения индекса ВСР	Вид воздействия					
	без воздействия		вибронакидка		мятное масло	
	среднее	станд. ошибка.	среднее	станд. ошибка.	среднее	станд. ошибка.
В первые две минуты работы	3.22	1.94	3.40	2.24	4.20	2.56
В течение минуты перед ошибкой	12.78*	7.15	13.36*	14.42	11.86*	5.72
За всё время работы	4.45	2.18	4.84	1.76	4.76	1.65

* Значимые отличия от значений в начале эксперимента ($F(1;70)=52.5$, $p > 0.0001$).

Субъективная оценка сонливости не коррелировала с реальным временем сна накануне. Однако количество сна коррелировало с другими субъективными параметрами перед началом опыта: с активностью ($r=0.31$, $p < 0.05$) до опыта и всеми оценками после опыта (Самочувствие: $r=-0.33$, $p < 0.01$, Активность: $r=0.39$, $p < 0.05$, Настроение: $r=-0.42$, $p < 0.01$), что подтверждает версию о стрессовой активации испытуемых перед экспериментом.

Время реакции в предварительном тестировании

Перед началом эксперимента испытуемые проходили тестирование на простую сенсомоторную реакцию и сенсомоторную реакцию с дистрактором на Универсальном психодиагностическом комплексе УПДК-МК. Ни время реакции, ни количество ошибок в среднем не изменились от опыта к опыту, и депривация сна не оказала влияния на выполнение этих тестов. Это подтверждает гипотезу о том, что испытуемые приходили на тренировочный эксперимент недостаточно выспавшимися и отдохнувшими и различия между тренировочным и основным экспериментами, скорее всего, будут смазаны.

Количество ошибок в предварительном тестировании на аппаратно-программном комплексе УПДК-МК составило в среднем 3.8 ошибки в тесте на простую сенсомоторную реакцию и 3.15 в тесте на сенсомоторную реакцию с дополнительным стимулом, что говорит о низком уровне внимания испытуемых уже в начале работы.

Время простой сенсомоторной реакции в тесте УПДК-МК отрицательно коррелирует с показателем Активность по опроснику САН перед экспериментом ($r=-0.27$, $p < 0.05$ – с активностью до опыта) и положительно – с показателем Настроение после эксперимента ($r=0.40$, $p < 0.01$). Значимой связи сенсомоторной реакции со временем сна в ночь перед экспериментом обнаружено не было, что также свидетельствует в пользу воздействия на испытуемых двух противоположных факторов: давления сонливости и стрессовой активации.

Индекс вариабельности сердечного ритма (ВСР)

Индекс ВСР отражает медленные изменения в балансе активности симпатической и парасимпатической нервной системы. В таблице 2 приведены значения средних и стандартных ошибок индекса ВСР в экспериментах с различными типами воздействия. Звездочками отмечены значимые отличия от значений в начале эксперимента ($F(1;70)=52.5$, $p > 0.0001$).

Во всех экспериментах, включая контрольный без депривации сна, наблюдалось постепенное повышение этого параметра, не достигающее уровня статистической значимости. Во всех опытах в течение минуты перед совершением ошибки наблюдалось крайне выраженное и значимое повышение этого параметра по сравнению с началом эксперимента, что свидетельствует о значительной активации симпатической нервной системы. Различия в индексе ВСР между периодом

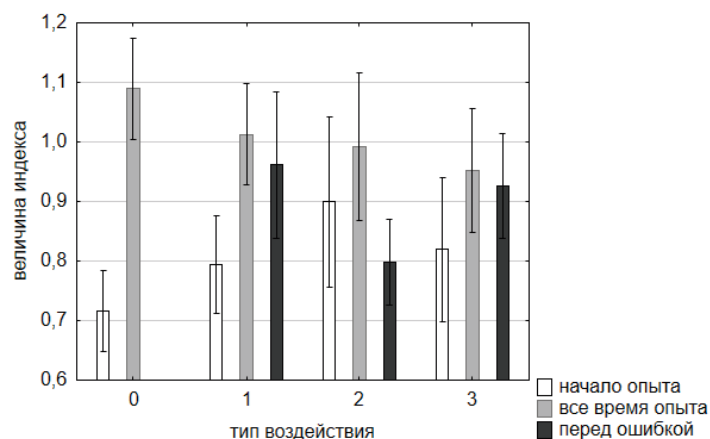


Рис. 2. Средние стандартные ошибки индекса соотношения мощностей в диапазонах альфа/бета в опытах с различным типом воздействия: 0 – тренировочный эксперимент; 1 – без воздействия; 2 – воздействие вибронакидки; 3 – воздействие запаха эфирного масла мяты перечной.

перед ошибкой и всем временем работы были наибольшими в эксперименте с вибронакидкой, хотя в целом значения оказались сходными для всех типов экспериментов. Наблюдался значительный разброс данных в зависимости от испытуемого, что видно по значениям стандартной ошибки.

Анализ электроэнцефалограммы

Из 20 испытуемых у 5 альфа-ритм был выражен слабо. Для сравнения параметров ЭЭГ использовались данные наиболее информативных для ситуации операторской работы и засыпания диапазонов: тета (4–7 Гц), альфа (8–13 Гц) и бета (14–30 Гц). Были выбраны следующие коэффициенты соотношений спектральной мощности диапазонов: альфа к тета, альфа к бета, тета к бета [15]. Проводилось сравнение этих коэффициентов в первые две минуты работы в симуляторе, за всё время работы и за 15 секунд до совершения ошибки.

1. Альфа/бета. За время эксперимента у испытуемых значимо возрастало значение индекса альфа/бета, что свидетельствует о постепенном расслаблении и снижении уровня внимания: дисперсионный анализ с повторными измерениями, разность начало эксперимента/весь эксперимент: $F(1;70)=18.9$, $p<0.0001$. Средние значения индекса для различных типов воздействия представлены на рис. 2. Различия в экспериментах без воздействия и с воздействием не достигали уровня статистической значимости из-за присутствия в выборке испытуемых с плоским альфа-ритмом.

Таким образом, основным результатом является повышение индекса альфа/бета в ходе эксперимента, что свиде-

тельствует о расслаблении и снижении уровня внимания. Тета-ритм, однако, демонстрировал более сложную динамику, несводимую к динамике сонливости и снижению уровня бдительности.

2. Альфа/тета. Для индекса альфа/тета также было выражено различие между началом и всем временем опыта, однако различия не достигли уровня статистической значимости.

Усиление альфа-ритма сопровождается усилением сонливости, расслабление и отвлечение от задания, и увеличение индексов альфа/тета и альфа/бета от начала работы к средним за всё время работы показателям отражает эти процессы.

3. Тета/бета. Падение индекса за время работы оказалось менее выраженным в опытах с депривацией сна, чем в контрольном опыте, где этот индекс был самым высоким (дисперсионный анализ с повторными измерениями, контраст начало работы/вся работа $F(1;70)=8.8$, $p<0.01$). Мы полагаем, что в данном случае дополнительная тета-активность, которая

Таблица 3. Изменения индекса уровня закрытия глаз (значения средних и стандартных ошибок)

Время измерения PERCLOS	Вид воздействия					
	без воздействия		вибронакидка		мятное масло	
	среднее	станд. откл.	среднее	станд. откл.	среднее	станд. откл.
В начале работы	0.13	0.074	0.11	0.052	0.12	0.06
За всё время работы	0.13	0.06	0.12	0.054	0.12	0.05
В течение минуты перед ошибкой	0.49*	0.44*	0.78*	0.38*	0.70*	0.35*

* Достоверные отличия при проведении дисперсионного анализа с повторными измерениями, $F(1;70)=71.36$, $p<0.001$.

является функциональной, была проявлением реакции на новую обстановку и не знакомый испытуемому эксперимент.

Индекс закрытия глаз (PERCLOS)

Средние и стандартные отклонения индекса закрытия глаз (PERCLOS) в разных экспериментах и экспериментальных условиях представлены в табл. 3; приведены значения индекса уровня закрытия глаз в опытах с различными типами воздействия.

Видно, что средние значения в начале эксперимента и в течение всего эксперимента значимо не различаются, то есть уровень бодрствования, согласно этому показателю, остается на высоком уровне. В то же время перед ошибками среднее значение значимо повышается (дисперсионный анализ с повторными измерениями, $F(1;70)=71.36$, $p<0.001$, выделено жирным шрифтом). Воздействия посредством массажной вибронакидки и мятного масла не оказывают значимого влияния на значение PERCLOS.

Кожно-гальваническая реакция (КГР)

Исчезновение фазической компоненты кожно-гальванической реакции в 85% случаев предшествовало первой ошибке испытуемого в эксперименте, однако после первой ошибки показывало сложный паттерн деактивации. Это соответствует картине, наблюдаемой в ЭЭГ: в пограничном состоянии между сном и бодрствованием наблюдаются нерегулярные колебания уровня внимания, которые могут быть быстрыми (порядка 10 секунд) и более медленными (порядка нескольких минут), когда физиологические показатели испытуемого, чувствительные к засыпанию, также нестабильны. Такое состояние, по нашим наблюдениям (в процессе публикации), может продолжаться приблизительно 10–30 минут и именно в этот период возникают основные ошибки.

Обсуждение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Предсказание качества управления по предшествующему тестированию и во время вождения

Мы сравнили количество допущенных испытуемыми ошибок с проведенной ранее серией экспериментов, в которой участники спали больше и по данным опросников не находились в состоянии хронического стресса [7]. Количество ошибок испытуемых в данном исследовании значительно возросло (2.22 ошибок на эксперимент по сравнению с $46/32=1.43$ в ранее выполненном исследовании [7]), что подчеркивает опасность депривации сна для качества вождения. Получено, что 22% от общего количества ошибок было вызвано отвлечением, а не засыпанием, это соответствует данным мировой литературы. Отсюда следует необходимость мониторинга не только степени сонливости испытуемого, но и его отвлечения от выполняемой задачи.

В отличие от прошлого исследования, у испытуемых была нарушена связь между реальным временем сна, субъективной сонливостью и самочувствием, что характерно для сочетания хронического недосыпа и стресса [16]. По косвенным признакам (тенденция к большему количеству ошибок под воздействием массажной вибронакидки и мятного масла), внимание к задаче поддерживалось за счет стресса, а качество вождения могло снижаться при расслаблении. Предсессионное тестирование выявило низкую внимательность испытуемых уже в начале эксперимента и подтверждало низкий уровень внимания испытуемых.

Индекс вариабельности сердечного ритма (ВСР) отражает изменение активности симпатической и парасимпатической систем человека [17]. Резкое изменение этого показателя характерно для ситуаций засыпания. Так, в работе [18] перед засыпанием в спокойной обстановке наблюдается снижение спектрального индекса ВСР, используемого и в нашем исследовании, за 10 минут до засыпания. Однако если человек активно борется с засыпанием, у него усиливается активность симпатической нервной системы, что наблюдалось в случае нашего исследования. Спектральный индекс ВСР демонстрировал дополнительную активацию СНС в ходе работы по сравнению с началом опыта, что отражает стрессирующее воздействие борьбы с сонливостью на испытуемых.

Показатель закрытия глаз PERCLOS хорошо проявляет себя при контроле уровня бодрствования и достоверно возрастает перед совершаемыми ошибками.

Кожно-гальваническая реакция и спектральные характеристики ЭЭГ человека показали сложную картину колебаний уровня внимания и бодрствования испытуемых после совершения первой ошибки. Так, альфа-ритм наиболее выражен в состоянии свободного бодрствования при внутреннем фокусе внимания и значительно возрастает при закрытии глаз. Тета-активность может быть связана

как с начальными стадиями засыпания (тогда одновременно снижается мощность альфа-ритма), так и с концентрацией на задаче и повышении когнитивного контроля [19, 20]. Бета-ритм в бодрствовании свидетельствует о сосредоточении на выполнении задачи, внешнем фокусе внимания. Динамика этих ритмов оказалась неоднозначной, что свидетельствует в пользу гипотезы о неустойчивом уровне внимания испытуемых, колебания которого не обязательно приводят к ошибкам.

По совокупности известных данных, при наступлении выраженной сонливости водителю целесообразно рекомендовать выпить чашку кофе, сделать несколько физических упражнений (эффект длится около 10–15 минут) или сделать короткий перерыв на сон (20–40 минут) [10].

Воздействие мятного масла и массажной вибронакидки на кресло на эффективность вождения

Динамика изменения средних значений указывает на то, что в экспериментах без воздействия уровень внимания был выше и больший процент ошибок совершался по невнимательности по сравнению с экспериментами с вибронакидкой и мятным маслом. Мятное масло и вибромассажная накидка ухудшали средние времена реакции и повышали количество ошибок в экспериментах. Хотя различия не достигли уровня статистической значимости, можно предположить, что они производили легкий расслабляющий эффект, снижая уровень стрессовой активации, которая препятствовала развитию сонливости у испытуемых.

Суммируя наши исследования и известные результаты в данной области, можно сформулировать следующие требования к системам контроля состояния водителей и других операторов, занятых монотонной деятельностью, при которой может возникнуть эффект декремента бдительности:

- предварительное тестирование состояния водителя: алкотестер, тестирование времени реакции. Время тестирования 5–15 минут. При длительном вождении рекомендуется проводить тестирование каждые 1.5–2 часа;
- контроль признаков отвлечения водителя в реальном времени: поза, направление взгляда, использование мобильного телефона, моргания и закрытие глаз;
- использование нескольких показателей, отражающих различные аспекты состояния испытуемого (например, поза и положение головы, закрытие глаз, кожно-гальваническая реакция, спектральные характеристики вариабельности сердечного ритма);
- определение индивидуальных порогов для измеряемых психофизиологических показателей.

Выводы

Создание в настоящее время «умных автомобилей» с интеллектуальным электронным помощником, берущим на себя рутинные функции, приводит к тому, что внима-

ние водителя снижается, а сонливость за рулем развивается быстрее. Хронический стресс и хроническая депривация сна ухудшают качество вождения и повышают число ошибок (в нашем исследовании – в среднем 2.2 ошибки за 90 минут).

На основании проведенного исследования сформулированы основные критерии для практического внедрения систем контроля состояния водителей и других операторов, занятых монотонной деятельностью:

- мониторинг отвлечения водителя (видеотрекинг позы, положения головы, направления взгляда, морганий и закрытия глаз);
- тестирование перед вождением времени и качества тестов на реакцию, блокировка управления при неудовлетворительных показателях; при длительном вождении – тестирование каждые 1.5–2 часа;
- мониторинг состояния водителя в реальном времени по морганиям, кожно-гальванической реакции или характеристикам сердечного ритма;
- в случае наступления выраженной сонливости водитель должен прервать вождение и принять рекомендованные меры по снижению сонливости: снижение температуры в салоне; чашка кофе; несколько физических упражнений; короткий сон 20–40 минут.

Массажная вибронакидка на кресло или периодическое распыление мятного масла, по нашим данным, не могут быть рекомендованы для улучшения внимания и снижения сонливости у водителей с депривацией сна.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Российской академии наук и Российского фонда фундаментальных исследований.

Авторы выражают благодарность сотрудникам кафедры нормальной физиологии Медицинского института Российского университета дружбы народов за организацию и помощь в проведении экспериментов.

Литература

1. WHO: Road traffic injuries, 13.12.2023. (<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>).
2. A. Morgan, F.L. Mannering
Accid. Anal. Prev., 2011, 43(5), 1852.
DOI: 10.1016/j.aap.2011.04.024.
3. J. Weng, Q. Meng
Saf. Sci., 2012, 50(4), 1034. DOI: 10.1016/j.ssci.2011.12.005.
4. К. Янушкевич
РБК. Тренды. Общество. Исследование: средняя продолжительность сна россиян составила 6.83 часа, 27.08.2021. (trends.rbc.ru/trends/social/6128ba189a79477d3d16f1f7).
5. B.C. Tefft
Sleep, 2018, 41(10), zsy144. DOI: 10.1093/sleep/zsy144.
6. F.V. Razvadauskas
Euromonitor International. Top Three Automotive and Mobility Trends in 2023.
(<https://www.euromonitor.com/article/top-three-automotive-and-mobility-trends-in-2023>).
7. О.Н. Ткаченко, В.Б. Дорохов, В.В. Дементуенко, Е.О. Гандина, Г.Н. Арсеньев, А.О. Таранов, Д.Р. Бакирова, Д.С. Свешиников
Социально-экологические технологии, 2022, 12(1), 62.
DOI: 10.31862/2500-2961-2022-12-1-62-80.
8. T. Vogelpohl, M. Kühn, T. Hummel, M. Vollrath
Accid. Anal. Prev., 2018, 126, 70. DOI: 10.1016/j.aap.2018.03.013.
9. D.M. Raizen, J. Mullington, C. Anaclet, G. Clarke et al.
Sleep, 2023, 46(9), zsad069. DOI: 10.1093/sleep/zsad069.
10. О.Н. Ткаченко, В.Б. Дорохов, В.В. Дементуенко
Социально-экологические технологии, 2020, 10(4), 482.
DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-4-482-509
11. A. Telpaz, B. Rhindress, I. Zelman, O. Tsimhoni
B Proc. 7th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications (UK, Nottingham, 1-3 September, 2015), US, NY, New York, Publ. Association for Computing Machinery, 2015, pp. 23–30.
DOI: 10.1145/2799250.2799267.
12. M. Mahachandra, Yassierli, E.D. Garnaby
Procedia Manuf., 2015, 4, 471. DOI: 10.1016/j.promfg.2015.11.064.
13. S. Scarpelli, V. Alfonsi, M. Gorgoni, M. Camaioni, A.M. Giannini, L. de Gennaro
Brain Sci., 2021, 11. DOI:10.3390/brainsci11081090.
14. Нейроком. Решения и продукция. Системы профессионального психофизиологического обследования. Универсальный психодиагностический комплекс УПДК-МК.
(<https://neurocom.ru/products/professional-systems/updk-mk/>).
15. I. Stancin, M. Cifrek, A. Jovic
Sensors, 2021, 21(11), 3786. DOI: 10.3390/s21113786.
16. N.B. Powell, J.K. Chau
Med. Clin. North Am., 2010, 94(3), 531.
DOI: 10.1016/j.mcna.2010.02.002.
17. J. Vicente, P. Laguna, A. Bartra, R. Bailon
Med. Biol. Eng. Comput., 2016, 54(6), 927.
DOI: 10.1007/s11517-015-1448-7.
18. Z. Shiner, S. Akselrod, Y. Dagan, A. Baharav
Auton. Neurosci., 2006, 130(1-2), 17.
DOI: 10.1016/j.autneu.2006.04.006.
19. L.I. Aftanas, S.A. Golosheikine
Neurosci. Lett., 2001, 310(1), 57.
DOI: 10.1016/s0304-3940(01)02094-8.
20. J.F. Cavanagh, M.J. Frank
Trends Cogn. Sci., 2014, 18(8), 414. DOI: 10.1016/j.tics.2014.04.012.

English

Psychophysiological Predictors of the Quality of Car Simulator Driving Against the Background of Chronic Sleep Deprivation*

Olga N. Tkachenko

Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology, RAS
5A Butlerov Str., Moscow, 117485, Russia
tkachenkoon@gmail.com

Vladimir B. Dorokhov

Professor,
Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology, RAS
5A Butlerov Str., Moscow, 117485, Russia
vbdorokhov@mail.ru

Valeriy V. Dementienko

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics, RAS
11 Mokhovaya Str., Moscow, 125009, Russia
v.dementienko@neurocom.ru

Eugenia O. Gandina

Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology, RAS
5A Butlerov Str., Moscow, 117485, Russia
gandina.e@ihna.ru

Gleb N. Arsenyev

Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology, RAS
5A Butlerov Str., Moscow, 117485, Russia
Byron100z@gmail.com

Anton O. Taranov

Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology, RAS
5A Butlerov Str., Moscow, 117485, Russia
psy.msu.ru@gmail.com

Alexandra N. Puchkova

Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology, RAS
5A Butlerov Str., Moscow, 117485, Russia
puchkovaan@gmail.com

Dmitry S. Sveshnikov

Medical Institute, RUDN University
8 Miklukho-Maklaya Str., Moscow, 117198, Russia
sveshnikov_ds@rudn.university

Abstract

Vigilance decrement during monotonous work was studied using driving simulator. The objectives of the study were to evaluate psychophysiological predictors of vigilance decrement and to test two non-

invasive techniques to reduce sleepiness: vibromassage chair cover and peppermint essential oil against the background of chronic sleep deprivation.

Eighteen healthy subjects with partial sleep deprivation participated in the study. Facial videotape, electroencephalogram (EEG), electrocardiogram (ECG) and cutaneous galvanic response (CGR) were recorded. Subjects were tested for sleepiness, general well-being, and reaction time.

Based on the test results, the subjects were in a state of chronic sleep deprivation and chronic stress. On average, they made 2.2 (0 to 7) errors per experiment. About 20% of the subjects' errors were estimated to be caused by distraction rather than by falling asleep. Conclusions were drawn about the dependence of the level of attention and sleepiness on several factors, and the need for further research. Based on the experimental data, a list of recommendations for the design of driver condition monitoring systems was developed.

Keywords: car drivers, partially automated driving, ECG, EEG, ESR, operator performance, sleepiness, videotracking, vigilance decrement.

**The work was financially supported by RFBR (project 19-29-06071).*

Images & Tables

Table 1. Errors and reaction times to events in experiments

Parameter	Event in the experiment					
	no exposure		massage seat cover		peppermint oil	
	mean	standard deviation	mean	standard deviation	mean	standard deviation
Number of mistakes	1.95	1.10	2.42	2.18	2.55	1.98
Reaction time to redness of the road, s	2.38	0.83	2.65	1.04	3.08	1.36
Stopping distance in front of a pedestrian, m	1.60	0.31	2.21*	1.10	2.30*	1.56

**Statistically significant differences from the first experiment without intervention, $p < 0.01$.*

Table 2. Changes in the heart rate variability index (mean and standard error values)

HRV index measurement time	Type of exposure					
	no exposure		massage seat cover		peppermint oil	
	mean	standard deviation	mean	mean	standard deviation	mean
In the first two minutes of work	3.22	1.94	3.40	2.24	4.20	2.56
Within a minute before the error	12.78*	7.15	13.36*	14.42	11.86*	5.72
During the entire period of work	4.45	2.18	4.84	1.76	4.76	1.65

** Significant differences from the values at the beginning of the experiment ($F(1;70)=52.5$, $p > 0.0001$).*

Table 3. Changes in the eye closure level index (means and standard deviations)

PERCLOS measurement time	Type of exposure					
	no exposure		massage seat cover		peppermint oil	
	mean	standard deviation	mean	standard deviation	mean	standard deviation
In the first two minutes of work	0.13	0.074	0.11	0.052	0.12	0.06
Within a minute before the error	0.13	0.06	0.12	0.054	0.12	0.05
During the entire period of work	0.49*	0.44*	0.78*	0.38*	0.70*	0.35*

** Significant differences when conducting ANOVA with repeated changes, $F(1;70)=71.36$, $p < 0.001$.*

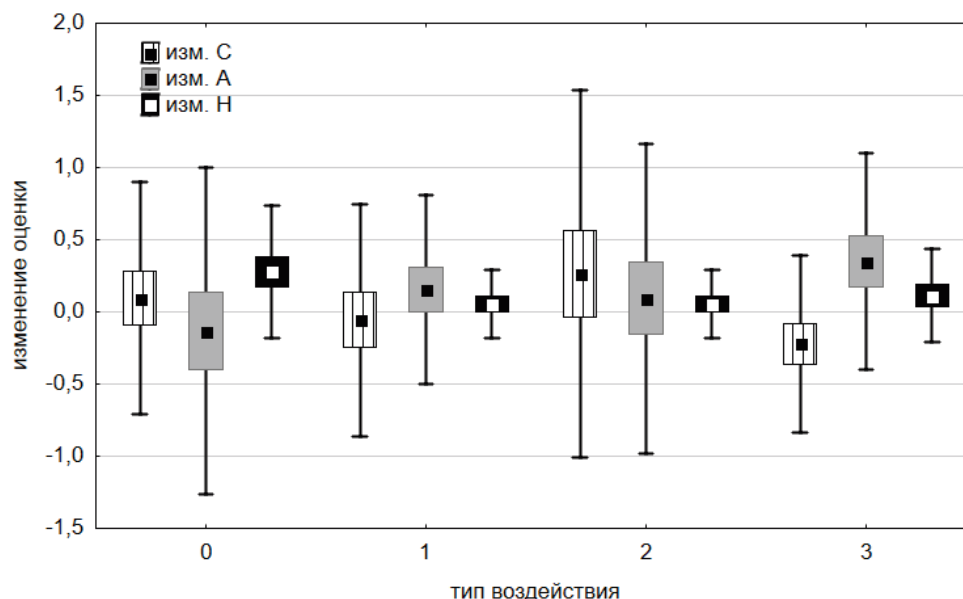


Fig. 1. Difference of Self-esteem (C), Activity (A) and Mood scales of the questionnaire after the experiment and before the experiment. X-axis shows the types of experiment: 0 – training session; 1 – with sleep deprivation; 2 – with sleep deprivation and massage seat cover; 3 – with sleep deprivation and exposure to peppermint oil.

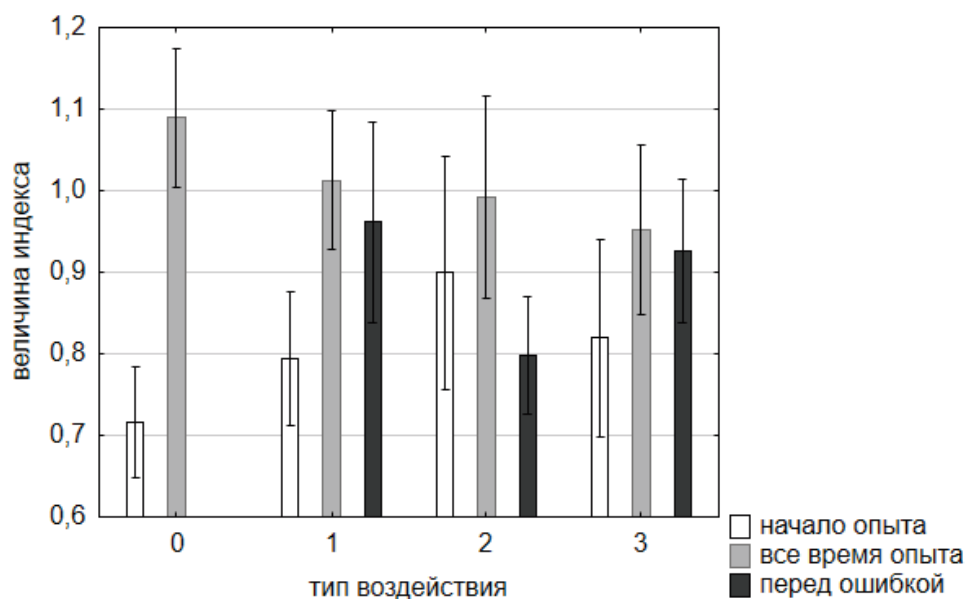


Fig. 2. Mean standard deviations of the alpha/beta ratio index in experiments with different types of exposure: 0 – training session; 1 – without exposure; 2 – massage seat cover; 3 – exposure to peppermint oil.

References

1. WHO: Road traffic injuries, 13.12.2023. (<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>).
2. A. Morgan, F.L. Mannering
Accid. Anal. Prev., 2011, 43(5), 1852.
DOI: 10.1016/j.aap.2011.04.024.
3. J. Weng, Q. Meng
Saf. Sci., 2012, 50(4), 1034. DOI: 10.1016/j.ssci.2011.12.005.
4. K. Yanushkevich
RBC. Trends. Society. Study: the Average Sleep Duration of Russians Was 6.83 Hours [RBC. Trendy. Obshchestvo. Issledovaniye: srednyaya prodolzhitel'nost sna rossiyan sostavila 6.83 chasa], 27.08.2021 (in Russian). (trends.rbc.ru/trends/social/6128ba189a79477d3d16f1f7).
5. B.C. Tefft
Sleep, 2018, 41(10), zsy144. DOI: 10.1093/sleep/zsy144.
6. F.V. Razvadauskas
Euromonitor International. Top Three Automotive and Mobility Trends in 2023. (<https://www.euromonitor.com/article/top-three-automotive-and-mobility-trends-in-2023>).
7. O.N. Tkachenko, V.B. Dorohov, V.V. Dementienko, E.O. Gandina, G.N. Arsenyev, A.O. Taranov, D.R. Bakirova, D.S. Sveshnikov
Environment and Human: Ecological Studies [Socialno-ekologicheskie tekhnologii], 2022, 12(1), 62 (in Russian). DOI: 10.31862/2500-2961-2022-12-1-62-80.
8. T. Vogelpohl, M. Kühn, T. Hummel, M. Vollrath
Accid. Anal. Prev., 2018, 126, 70. DOI: 10.1016/j.aap.2018.03.013.



9. **D.M. Raizen, J. Mullington, C. Anacleit, G. Clarke et al.** *Sleep*, 2023, **46**(9), zsad069. DOI: 10.1093/sleep/zsad069.
10. **O.N. Tkachenko, V.B. Dorohov, V.V. Dementienko** *Environment and Human: Ecological Studies [Socialno-ekologicheskie tekhnologii]*, 2020, **10**(4), 482 (in Russian). DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-4-482-509
11. **A. Telpaz, B. Rhindress, I. Zelman, O. Tsimhoni** In *Proc. 7th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications (UK, Nottingham, 1-3 September, 2015)*, US, NY, New York, Publ. Association for Computing Machinery, 2015, pp. 23–30. DOI: 10.1145/2799250.2799267.
12. **M. Mahachandra, Yassierli, E.D. Garnaby** *Procedia Manuf.*, 2015, **4**, 471. DOI: 10.1016/j.promfg.2015.11.064.
13. **S. Scarpelli, V. Alfonsi, M. Gorgoni, M. Camaioni, A.M. Giannini, L. de Gennaro** *Brain Sci.*, 2021, **11**. DOI: 10.3390/brainsci11081090.
14. **Neurocom. Solutions and Products. Systems of Professional Psychophysiological Examination. Universal Psychodiagnostic Complex UPDC-MK [Neyrokom. Resheniya i produktsia. Sistemy professionalnogo psikhofiziologicheskogo obsledovaniya. Universalny psikhodiagnostichesky kompleks UPDK-MK]** (in Russian). (<https://neurocom.ru/products/professional-systems/updk-mk/>).
15. **I. Stancin, M. Cifrek, A. Jovic** *Sensors*, 2021, **21**(11), 3786. DOI: 10.3390/s21113786.
16. **N.B. Powell, J.K. Chau** *Med. Clin. North Am.*, 2010, **94**(3), 531. DOI: 10.1016/j.mcna.2010.02.002.
17. **J. Vicente, P. Laguna, A. Bartra, R. Bailon** *Med. Biol. Eng. Comput.*, 2016, **54**(6), 927. DOI: 10.1007/s11517-015-1448-7.
18. **Z. Shiner, S. Akselrod, Y. Dagan, A. Baharav** *Auton. Neurosci.*, 2006, **130**(1-2), 17. DOI: 10.1016/j.autneu.2006.04.006.
19. **L.I. Aftanas, S.A. Golocheikine** *Neurosci. Lett.*, 2001, **310**(1), 57. DOI: 10.1016/s0304-3940(01)02094-8.
20. **J.F. Cavanagh, M.J. Frank** *Trends Cogn. Sci.*, 2014, **18**(8), 414. DOI: 10.1016/j.tics.2014.04.012.