

DOI: 10.31862/2500-2961-2023-13-3-313-336

УДК 159.91

**О.Н. Ткаченко¹, В.Б. Дорохов¹, В.В. Дементенко²,
Е.О. Гандина¹, Г.Н. Арсеньев¹, А.О. Таранов¹,
А.Н. Пучкова¹, Д.Р. Бакирова¹, Д.С. Свешников³**

¹ Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН,
117485 г. Москва, Российская Федерация

² Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
125009 г. Москва, Российская Федерация

³ Российский университет дружбы народов,
117198 г. Москва, Российская Федерация

Несоответствие субъективных и объективных показателей самочувствия при выполнении монотонной операторской деятельности на фоне хронической депривации сна

Цель исследования – оценка психофизиологических предикторов качества выполнения монотонной деятельности на фоне хронического стресса и частичной депривации сна. В экспериментах принимали участие 14 испытуемых в возрасте 18–22 года. Каждый испытуемый участвовал в четырех экспериментальных сессиях с частично автоматизированным сценариями управления компьютерным симулятором вождения автомобиля: первый эксперимент (15 минут) – обучающая сессия в симуляторе, регистрация фона без депривации сна; второй эксперимент – депривация сна (90 минут), третий эксперимент – депривация сна и периодическое воздействие массажной вибронакидки (90 минут); четвертый эксперимент – депривация сна и периодическое распыление мятного масла из аромадиффузора (90 минут) . Раз в 3–7 минут от испытуемого

© Ткаченко О.Н., Дорохов В.Б., Дементенко В.В., Гандина Е.О., Арсеньев Г.Н., Таранов А.О., Пучкова А.Н., Бакирова Д.Р., Свешников Д.С., 2023



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License
The content is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

требовалось реагировать на два типа стимулов: 1) постепенно изменяющийся; 2) появляющийся неожиданно и требующий маневрирования. Интервалы между стимулами и порядок стимулов менялись случайным образом. Регистрировалась данные симулятора вождения автомобиля, электроэнцефалограмма по стандартной системе 10–20 с частотой дискретизации 1000 Гц, электрокардиограмма и кожно-гальваническая реакция. На мониторе перед испытуемым была закреплена трехмерная видеокамера, отслеживающая положение головы и изменения мимики испытуемого на протяжении эксперимента. Испытуемый проходил опросники на сонливость и общее самочувствие, также перед экспериментом тестировалось время реакции. По результатам опросников и выполнения тестов испытуемые находились в состоянии хронической депривации сна и хронического стресса. Статистически значимых различий между экспериментами после частичной депривации сна без дополнительного воздействия, с использованием массажной вибронакидки на кресло и периодическим распылением мятного масла раз в 10 минут обнаружить не удалось. Показатели степени закрытия глаз (PERCLOS) и спектральный индекс вариабельности сердечного ритма показали значительное статистически достоверное увеличение перед ошибками, однако имел место большой разброс значений, что, по нашему мнению, может быть связано с ошибками, вызванными отвлечением от выполнения задания на собственные мысли, а не засыпанием как таковым. Значения физиологических показателей перед ошибками указывают на различные причины ошибок в экспериментах без воздействия и с воздействием мятным маслом или массажной вибронакидкой.

Ключевые слова: депривация сна, частично автоматизированное вождение, ЭКГ, сонливость, видеотрекинг

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Российской академии наук и Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 19-29-06071.

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

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Несоответствие субъективных и объективных показателей самочувствия при выполнении монотонной операторской деятельности на фоне хронической депривации сна / Ткаченко О.Н., Дорохов В.Б., Дементенко В.В. и др. // Социально-экологические технологии. 2023. Т. 13. № 3. С. 313–336. DOI: 10.31862/2500-2961-2023-13-3-313-336

DOI: 10.31862/2500-2961-2023-13-3-313-336

**O.N. Tkachenko¹, V.B. Dorokhov¹, V.V. Dementienko²,
E.O. Gandina¹, G.N. Arsenyev¹, A.O. Taranov¹,
A.N. Puchkova¹, D.R. Bakirova¹, D.S. Sveshnikov³**

¹ Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology,
Russian Academy of Sciences,
Moscow, 117485, Russian Federation

² Institute of Radio Engineering and Electronics
named after V.A. Kotelnikov RAS,
Moscow, 125009, Russian Federation

³ Peoples' Friendship University of Russia,
Moscow, 117198, Russian Federation

Discrepancy between subjective and objective health indicators when performing monotonous operator activities against the background of chronic sleep deprivation

The aim of the study was to investigate various psychophysiological predictors of the quality of monotonous activity performance against the background of sleep deprivation. Fourteen subjects aged 18–22 years took part in the experiments. Each subject participated in four experimental sessions with partially automated control scenarios in a computerized driving simulator: the first experiment (15 minutes) – training session in the simulator without sleep deprivation; the second experiment – sleep deprivation (90 minutes); the third experiment – sleep deprivation and periodic exposure to a massage seat cover (90 minutes); the fourth experiment – sleep deprivation and periodic spraying of peppermint oil from an aroma diffuser (90 minutes). Every 3–7 minutes, subjects were asked to respond to two types of stimuli: 1) gradually changing; 2) appearing unexpectedly and requiring maneuvering. Stimulus intervals and stimulus order were varied randomly. Car driving simulator data, electroencephalogram using the standard

10–20 system with a sampling rate of 1000 Hz, electrocardiogram and skin-galvanic response were recorded. A three-dimensional video camera was mounted on a monitor in front of the subject to track head position and changes of the subject's facial expressions throughout the experiment. Subjects completed questionnaires on sleepiness and general well-being, and reaction time was also tested before the experiment. According to the results of the questionnaires and test performance, the subjects were in a state of chronic sleep deprivation and chronic stress. No statistically significant differences between the experiments after partial sleep deprivation without additional stimulation, with the use of a massage seat cover and periodic spraying of peppermint oil every 10 minutes were seen. The eye closure rate (PERCLOS) and spectral index of heart rate variability showed a significant statistically reliable increase before errors. The values of physiological indices before errors indicate different causes of errors in experiments without and with exposure to peppermint oil or massage seat cover.

Key words: sleep deprivation, partially automated driving, ECG, sleepiness, video tracking

Acknowledgments. This work was supported by the Russian Academy of Sciences and the Russian Foundation for Basic Research, grant No. 19-29-06071.

The authors are grateful to the staff of the Department of Normal Physiology, Medical Institute, Peoples' Friendship University of Russia, for organization and assistance in the experiments.

FOR CITATION: Tkachenko O.N., Dorokhov V.B., Dementienko V.V. et al. Discrepancy between subjective and objective health indicators when performing monotonous operator activities against the background of chronic sleep deprivation. *Environment and Human: Ecological Studies*. 2023. Vol. 13. No. 3. Pp. 313–336. (In Rus.) DOI: 10.31862/2500-2961-2023-13-3-313-336

Введение

Проблема аварийности на дорогах, очевидно, становится все острее с ростом автомобильного трафика. Так, по данным Всемирной организации здравоохранения, в ДТП ежегодно гибнет порядка 1,3 млн человек, а от 20 до 50 млн получают травмы, причем человеческий фактор ответственен приблизительно за 90% аварий¹. На засыпание приходится от 20 до 25% ДТП с тяжелыми последствиями, а еще около 20% аварий могут быть связаны с отвлечением на мобильные телефоны [Morgan,

¹ WHO: Road traffic injuries. 2021. URL: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries> (accessed: 22.05.2023).

Mannering, 2011; Weng, Meng, 2012]. В мегаполисах, где автомобильный трафик наиболее насыщен, жители страдают от светозвукового загрязнения, высокого уровня стресса и нередко находятся в состоянии хронической депривации сна. По данным исследования компании Amazfit с участием 2,9 млн респондентов, средняя продолжительность сна всех россиян составляет всего 6,83 ч, причем Москва и Московская область входят в тройку худших по этому показателю регионов (<https://trashbox.ru/link/2021-08-27-amazfit-sleep-study-russians>). При этом депривация сна (менее шести часов ночного сна перед вождением) повышает риск заснуть за рулем в 2,6 раза, а менее четырех часов сна – в 15 раз [Tefft, 2018].

В последние годы с развитием искусственного интеллекта на рынок выходят все более высокотехнологичные модели автомобилей. По данным Euromonitor International, в 2023 г. ожидается бум продаж высокоавтоматизированных автомобилей (рост на 216% по сравнению с 2022 г.), которые берут на себя управление в рутинных ситуациях². В ряде исследований было показано, что уровень внимания в полуавтоматических транспортных средствах снижается быстрее, сонливость нарастает в течение 20–30 минут по сравнению с аналогичными дизайнами с полностью ручным управлением [Vogelpohl et al., 2018; Сравнение эффективности управления..., 2022].

Исследование литературы [Ткаченко, Дорохов, Дементенко, 2020] показывает, что для улучшения уровня внимания и качества монотонной деятельности могут быть применены различные способы, в том числе вибромассажные накидки на кресло [Telpaz et al., 2015] или распыление эфирных масел, в частности, мятного [Mahachandra, Yassierli, Garnaby, 2015].

Целью нашего исследования была оценка психофизиологических предикторов качества выполнения монотонной деятельности на фоне хронического стресса и частичной депривации сна.

Задачами исследования были проверка эффективности периодического воздействия массажной вибронакидки и распыления мятного масла посредством аромадиффузора для повышения качества выполнения операторской деятельности, а также оценка возможности предсказания работоспособности испытуемого по предшествующему тестированию на время сенсомоторной реакции, времени сна в ночь перед экспериментом и субъективной оценке состояния.

² Top Three Automotive and Mobility Trends in 2023. Euromonitor International. URL: <https://www.euromonitor.com/article/top-three-automotive-and-mobility-trends-in-2023> (accessed: 22.06.2023).

Методика

В экспериментах приняли участие 14 испытуемых в возрасте 18–22 лет без неврологических заболеваний. Испытуемые были студентами медицинской специальности с высокой учебной нагрузкой и хронической депривацией сна.

До и после каждой экспериментальной сессии регистрировались фоновые физиологические показатели: две минуты с открытыми и две минуты с закрытыми глазами.

Каждый испытуемый принял участие в четырех экспериментальных сессиях, промежутков между сессиями составлял от трех дней до трех недель.

1. Сессия без депривации сна, она же – ознакомительная (далее – эксперимент типа 0), длительность – 15 мин.

2. Сессия с депривацией сна: не более 4 часов сна в ночь перед экспериментом (далее – эксперимент типа 1), длительность – 90 мин.

3. Сессия с депривацией сна: не более 4 часов сна в ночь перед экспериментом и периодическим (раз в десять минут) подбуживающим воздействием массажной вибронакидки на кресло раз в 10 минут (далее – эксперимент типа 2), длительность – 90 мин.

3. Сессия с депривацией сна: не более 4 часов сна в ночь перед экспериментом и периодическим распылением мятного масла из аромадиффузора раз в 10 минут (далее – эксперимент типа 3), длительность – 90 мин.

Эксперименты проводили в дневное время, с 13 до 16 ч, в затемненной звукоизолированной комнате, оснащенной кондиционером, при температуре 23 °С, с промежутком между опытами от 2 до 7 дней. Перед серией экспериментов испытуемые проходили опросники «Питтсбургская шкала сонливости» и пятифакторный опросник личностных черт «Опросник Большой Пятерки». Перед каждой экспериментальной сессией они заполняли опросник «Шкала сонливости Эпворта», а до и после экспериментальной сессии – опросник «САН» (самочувствие – активность – настроение). Кроме того, перед исследованием проводилось тестирование времени реакции испытуемого на простые и усложненные неправильными подсказками стимулы на аппаратно-программном комплексе УПДК-МК (производство АО «Нейроком»), утвержденного для профессионального психофизиологического обследования машинистов поездов холдингом «Российские железные дороги (<https://neurocom.ru/products/professional-systems/updk-mk/>). В течение опыта велась регистрация данных по электроэнцефалограмме (ЭЭГ) по стандартной системе 10–20 с частотой дискретизации 1000 Гц, а также по электрокардиограмме (ЭКГ) и кожно-гальванической реакции (КГР) при помощи

аппаратно-программного комплекса NeoRecNVX36 (Medical Computer Systems, Зеленоград). Электроды подключались по монополярной схеме. Использовались высоко- и низкочастотный, а также режекторный фильтры (0,5, 35 и 50 Гц соответственно). На мониторе в комнате испытуемого была закреплена видеокамера, отслеживающая положение головы и изменения мимики испытуемого на протяжении эксперимента. Данные с симулятора вождения с частотой опроса 6 Гц заносились в лог-файл на компьютер испытуемого. Перед каждым экспериментом время на компьютерах испытуемого и экспериментатора синхронизировалось посредством подключения к удаленному серверу. Испытуемый во время эксперимента находился в кресле с подголовником на комфортном расстоянии от монитора и управлял симулятором посредством игровых руля и педалей.

Изображение в симуляторе представляло собой стилизованный вид от первого лица 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. Скорость движения регулируется педалями в диапазоне 5–100 км/ч и отображается на спидометре в нижней части экрана.

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

1. Постепенное покраснение полосы, по которой движется испытуемый, в течение десяти секунд. Требуемая реакция – съехать на любую соседнюю полосу; по прошествии десяти секунд вернуться на свою полосу и продолжить движение.

2. Появление на фиксированном расстоянии перед автомобилем (30 м) неподвижного препятствия в виде стилизованной фигурки пешехода. Требуемая реакция – объехать пешехода, вернуться на свою полосу и продолжить движение.

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

Предварительная обработка физиологических сигналов

1. Видеоизображение лица испытуемого. На протяжении эксперимента обрабатывалось покадрово в программно-вычислительной среде Python Anaconda с использованием библиотеки OpenCV для Python и программного обеспечения собственной разработки коллектива.

Предварительно обученный алгоритм находил на изображении расположение лица испытуемого, а на нем, в свою очередь, выделял 68 точек, соответствующих положению контура лица, бровей, носа, губ, границ нижних и верхних век. После приведения обнаруженных точек лица к фронтальному ракурсу и стандартному размеру вычислялось расстояние от верхнего до нижнего века для обоих глаз, полученные значения усредняли. После этого производилось вычисление степени закрытия глаз на протяжении всего эксперимента: закрытием считались промежутки времени, когда расстояние между веками составляло менее $\frac{1}{4}$ от медианного значения, включая как моргания, так и длительные закрывания глаз.

2. ЭЭГ. На протяжении эксперимента вручную размечалась экспертом на артефакты. Обработка ЭЭГ (вычисление спектральных характеристик), в частности, спектральный анализ и синхронизация с другими данными также производилась в программно-вычислительной среде Python Anaconda с использованием библиотеки mne и программного обеспечения собственной разработки коллектива.

3. ЭКГ. Разметка сокращений сердца производилась полуавтоматически, с последующим визуальным контролем эксперта. После разметки строился временной ряд последовательных RR-интервалов, который интерполировался для последующего спектрального анализа. Рассматривался максимум отношения низких частот к высоким, вычисленный за 2-минутный предшествующий интервал, где низкие частоты лежат в спектральном диапазоне 0,04–0,15 Гц, а высокие частоты – в диапазоне 0,15–0,5 Гц.

Результаты

Опросник САН (самочувствие, активность, настроение)

Наблюдалась ярко выраженная связь между всеми оценками опросника САН: параметр «самочувствие» демонстрировал ярко выраженную прямую корреляцию с параметром «настроение» ($r = 0,76$, $p < 0,001$ до опыта, $r = 0,77$, $p < 0,001$ после опыта), и обратную – с параметром «самочувствие» ($r = -0,74$, $p < 0,001$ до опыта, $r = -0,89$, $p < 0,001$). В целом, это характеризует состояние экспериментальной выборки: высокие параметры активности отмечались в комбинации с плохим самочувствием и сниженным настроением, что может говорить о постоянном присутствии стресса и активации не за счет восстановления во сне, а за счет стрессового ответа организма. Об этом же говорит единственная общая для всех опытов тенденция изменения: увеличение параметра активности после опыта (табл. 1).

Показания опросника САН до и после экспериментов
[Wellbeing-Activity-Mood questionnaire scales before and after the experiments]

Параметры [Parameter]		Контроль [Control, no sleep deprivation]		Опыты с депривацией сна [Sleep deprivation]					
				Без воздействия [No stimulation]		Вибронакидка [Massage seat cover]		Мятное масло [Peppermint oil]	
		Среднее [Mean]	Стандартное отклонение [Standard deviation]	Среднее [Mean]	Стандартное отклонение [Standard deviation]	Среднее [Mean]	Стандартное отклонение [Standard deviation]	Среднее [Mean]	Стандартное отклонение [Standard deviation]
Самочувствие [Wellbeing]	До опыта [Before experiment]	3,2	0,7	3,8	1,2	3,8	1,0	4,0	1,0
Активность [Activity]		4,2	0,9	3,8	1,0	3,6	0,8	3,6	1,0
Настроение [Mood]		3,1	0,6	3,2	1,2	3,1	1,0	3,5	1,0
Самочувствие [Wellbeing]	После опыта [After experiment]	3,0	1,0	3,8	0,8	4,1	1,0	3,7	0,9
Активность [Activity]		4,5	1,3	4,0	0,9	3,7	0,8	4,0	0,8
Настроение Mood		2,7	1,0	3,4	0,9	3,5	0,9	3,2	0,9

Для анализа изменения самооощущения мы вычитали значения показателей «самочувствие», «активность», «настроение» в начале опыта из значений в конце, чтобы отрицательные значения изменения отвечали ухудшению состояния. В целом, изменения оценок были невелики и однонаправлены в контрольном опыте и в опытах без воздействия и с воздействием вибронакидки. Однако можно отметить отличие паттерна изменения оценок в опыте с воздействием мятного масла, где вместо однонаправленных изменений показатель активности улучшился, а настроения и самочувствия – ухудшился (рис. 1).

Самооценка сонливости и время сна накануне

Время сна накануне эксперимента контролировалось актиграфом Condog, в качестве времени был отмечен период неподвижности и низкого освещения. Это оценка указывает верхнюю границу потенциального времени сна, добавляя к нему время неподвижного засыпания. Для эксперимента без депривации сна это период составил $394,5 \pm 94,88$ мин (от 4 до 8 ч, в среднем около 6,5 ч); в опытах с депривацией – $246,9 \pm 16,7$ мин (без воздействия), $247,8 \pm 20,35$ мин (вибронакидка), $242,5 \pm 14,6$ мин (мятное масло), что говорит о четком соблюдении требований к депривации сна (не более 4 ч сна) и в среднем недостаточном привычном времени ночного сна (6,5 ч).

Участники исследования перед началом опыта должны были отчитаться о собственной сонливости. В контрольном опыте без депривации сна оценка составила $4,3 \pm 1,42$, в опыте с депривацией и без воздействия – $5,23 \pm 2,09$; в опыте с вибронакидкой – $5,29 \pm 1,94$; в опыте с мятным маслом – $4,93 \pm 1,59$. Как и ожидалось, оценки после депривации сна были выше, чем без нее, однако различия не достигли уровня статистической значимости из-за достаточно высокой оценки сонливости без депривации сна.

Субъективная оценка сонливости не коррелировала с реальным временем сна накануне. Однако количество сна коррелировало с другими субъективными параметрами перед началом опыта: с активностью ($r = 0,28$, $p < 0,05$) до опыта и всеми оценками после опыта (самочувствие: $r = -0,38$, $p < 0,01$, активность: $r = 0,33$, $p < 0,05$; настроение: $r = -0,40$, $p < 0,01$).

Отсутствие связи времени сна и сонливости, а также малое количество сна накануне опыта без депривации указывает, что представители данной выборки испытуемых испытывали хронический недостаток сна, в котором нарушается способность объективно оценивать собственную сонливость и работоспособность [Powell, 2010]. Связь времени сна с субъективными оценками САН после опыта может говорить о большем вкладе депривации сна не в изначальное состояние испытуемых, но в изменение самооощущения после нагрузки.

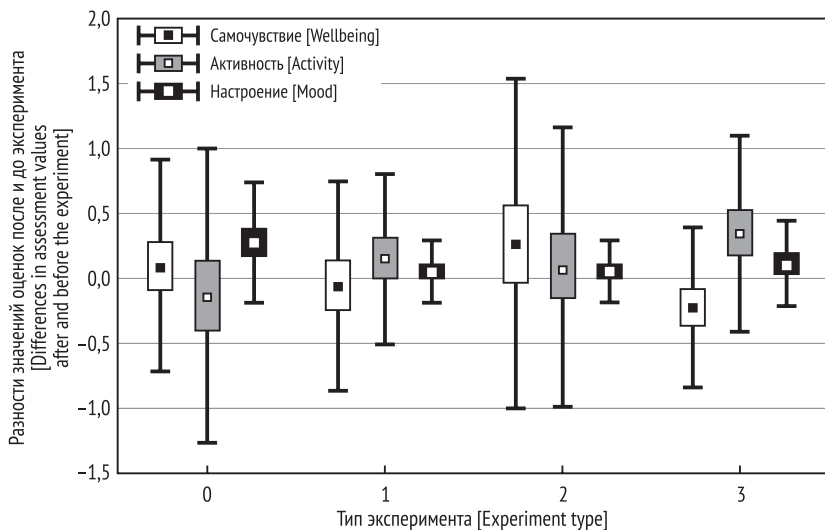


Рис. 1. Изменение оценки самочувствия, активности и настроения после проведения экспериментов

Тип эксперимента: 0 – контрольный опыт без депривации сна; 1 – без воздействия, опыт с депривацией сна; 2 – воздействие вибронакидки, опыт с депривацией сна; 3 – воздействие запаха эфирного масла мяты перечной, опыт с депривацией сна

Fig. 1. Changes in Wellbeing, Activity and Mood scales after experiments

Type of experiment: 0 – control experiment without sleep deprivation; 1 – no impact, experience with sleep deprivation; 2 – impact of vibronacid, experience with sleep deprivation; 3 – exposure to the smell of peppermint essential oil, experience with sleep deprivation

Тестирование на комплексе УПДК и ошибки в симуляторе

Перед началом каждого опыта испытуемые проходили тестирование простой и сложной сенсомоторной реакции на комплексе УПДК. Ни время реакции, ни количество ошибок в среднем не изменились от опыта к опыту, и депривация сна не оказала влияния на выполнение этих тестов (табл. 2). Время реакции показало обратную корреляцию с показателем активности по опроснику САН ($r = -0,33$, $p < 0,05$ – с активностью до опыта; $r = -0,39$, $p < 0,01$ – с активностью после опыта), прямую корреляцию с показателем настроения после опыта ($r = 0,44$, $p < 0,01$), значимой связи со временем сна обнаружено не было.

Количество совершенных в симуляторе ошибок значимо не менялось от опыта к опыту ($1,91 \pm 1,93$ в опыте без воздействия, $2,50 \pm 2,03$ в опыте с вибронакидкой и с мятным маслом).

Таблица 2

**Время реакции и количество ошибок в психомоторном тесте на комплексе УПДК перед каждым опытом
[Reaction time and number of errors in the psychomotor test on the UPK complex before each experiment]**

	Тип эксперимента [Experiment type]	Средний балл времени реакции [Mean reaction time]	Стандартное отклонение [Standard deviation]
<i>Простая психомоторная реакция [Simple psychomotor test]</i>			
Время реакции, с [Reaction time, s]	Контроль без депривации [Control, no sleep deprivation]	1,57	0,14
Количество ошибок [Number of errors]		3,60	3,67
Время реакции, с [Reaction time, s]	Без воздействия [No impact, experience with sleep deprivation]	1,52	0,15
Количество ошибок [Number of errors]		3,69	2,53
Время реакции, с [Reaction time, s]	Вибронакидка [Impact of vibronacid, experience with sleep deprivation]	1,52	0,16
Количество ошибок [Number of errors]		3,57	2,37
Время реакции, с [Reaction time, s]	Мятное масло [Exposure to the smell of peppermint essential oil, experience with sleep deprivation]	1,55	0,14
Количество ошибок [Number of errors]		4,07	3,75
<i>Психомоторная реакция в тесте с дистрактором [Psychomotor test with distraction]</i>			
Время реакции, с [Reaction time, s]	Контроль без депривации [Control, no sleep deprivation]	0,74	0,15
Количество ошибок [Number of errors]		1,50	1,90
Время реакции, с [Reaction time, s]	Без воздействия [No impact, experience with sleep deprivation]	0,74	0,15
Количество ошибок [Number of errors]		1,73	1,28
Время реакции, с [Reaction time, s]	Вибронакидка [Impact of vibronacid, experience with sleep deprivation]	0,76	0,12
Количество ошибок [Number of errors]		2,38	2,10
Время реакции, с [Reaction time, s]	Мятное масло [Exposure to the smell of peppermint essential oil, experience with sleep deprivation]	0,82	0,18
Количество ошибок [Number of errors]		3,0	2,63

Времена реакции на два типа препятствий продемонстрировали противоположные тенденции. Реакция на плавно возникающее препятствие (покраснение дороги) была самой быстрой в опыте без воздействия, замедлялась в опыте с вибронакидкой и была максимальной в опыте с мятным маслом. В случае остановки перед внезапно возникающим пешеходом расстояние остановки было больше в опытах с воздействием, а в опыте без воздействия – минимальным (медленная реакция) (табл. 3). Между собой эти параметры реакции не коррелировали.

С количеством совершенных за опыт ошибок коррелировало только среднее время реакции на плавно появляющееся препятствие ($r = 0,78, p < 0,001$), значимая корреляция сохранялась и при анализе опытов с разными типами воздействия по отдельности (без воздействия: $r = 0,65, p < 0,05$; вибронакидка: $r = 0,79, p < 0,01$; мятное масло: $r = 0,90, p < 0,001$). Видимо, именно неспособность испытуемого в ходе опыта адекватно отреагировать даже на небыстро появившееся препятствие наиболее ярко отражала повышение уровня сонливости или отвлечение от выполнения задания, которые сопровождали ошибки.

Индекс вариабельности сердечного ритма

Индекс вариабельности сердечного ритма (ВСР) отражает медленные изменения в балансе активности симпатической и парасимпатической нервной системы. Для оценки этого параметра требуется сбор данных не менее чем в течение одной минуты, но он позволяет оценить общий тонус нервной системы. Во всех опытах, включая контрольный без депривации сна, наблюдалось небольшое повышение этого параметра в ходе опыта (сравнение показателя ВСР в начале опыта и за все время вождения, дисперсионный анализ с повторными измерениями, $F(1,37) = 16,71, p < 0,001$).

Во всех опытах в течение минуты перед совершением ошибки наблюдалось крайне выраженное и значимое повышение этого параметра (сравнение индекса в ходе работы и перед ошибкой, дисперсионный анализ с повторными измерениями, $F(1,36) = 54,67, p < 0,001$), что свидетельствует о значительной активации симпатической нервной системы (значения индекса см. табл. 4). Различия в индексе ВСР между периодом перед ошибкой и всем временем работы были наибольшими в опыте 1 ($8,17 \pm 6,54$) и практически одинаковыми в опытах с вибронакидкой ($6,30 \pm 6,89$) и мятным маслом ($6,37 \pm 4,09$), хотя эта разница не имела статистической значимости.

Таблица 3

**Количество совершенных ошибок и параметры реакции на два типа препятствий
в симуляторе вождения при различных типах воздействия**
**[Number of errors made and response parameters for the two types of events
in the driving simulator under different types of stimulation]**

	Без воздействия [No impact, experience with sleep deprivation]		Вибронакидка [Impact of vibronacid, experience with sleep deprivation]		Мятное масло [Exposure to the smell of peppermint essential oil, experience with sleep deprivation]	
	Среднее [Mean]	Стандартное отклонение [Standard deviation]	Среднее [Mean]	Стандартное отклонение [Standard deviation]	Среднее [Mean]	Стандартное отклонение [Standard deviation]
Количество ошибок в опыте [Number of errors]	2,00	1,88	2,50	2,03	2,50	2,03
Время реакции на покраснение дороги, с [Reaction time, event type 1, s]	2,30	0,92	2,72	1,16	3,19	1,46
Дистанция остановки перед пешеходом, м [Distance between car and pedestrian, event type 2, m]	1,67	0,25	2,37	1,20	2,50	1,71

Активность в спектральном диапазоне низких частот ВСП ассоциируют с симпатической нервной системой, однако на нее также влияет парасимпатическая нервная система. Активность в диапазоне высоких частот подвержена только влиянию парасимпатической нервной системы. Чтобы учесть это, используют отношение низких частот к высоким.

Переход от бодрствования ко сну сопровождается снижением активности симпатической нервной системы и усилением парасимпатической [Vincente et al., 2016]. Резкое снижение этого показателя интерпретируется как признак приближающегося засыпания. В исследовании [Shiner et al., 2006] снижение значения отношения низких частот к высоким наступало в течение 10 минут, предшествующих засыпанию, однако у испытуемых, страдающих обструктивным апноэ сна, картина несколько отличалась. Иногда падение значения отношения низких частот к высоким случается даже после установления первой стадии сна, определенной по ЭКГ.

Однако если человек активно борется с засыпанием, у него усиливается активность симпатической нервной системы, что наблюдалось в случае нашего исследования.

Индекс закрытия глаз

Во всех опытах, включая контрольный, не было обнаружено значимого изменения индекса закрытия глаз (PERCLOS). Как при сравнении индекса в первые две минуты работы и за все время опыта, так и во всех опытах с депривацией сна наблюдалось значительное увеличение этого параметра перед совершением ошибки, при этом тип воздействия не оказывал значимого влияния на уровень закрытия глаз (дисперсионный анализ с повторными измерениями, $F(1,36) = 71,36$, $p < 0,001$), в среднем в ходе опыта этот показатель составлял 0,12, а перед совершением ошибки – 0,65 (табл. 5).

У ряда испытуемых перед совершением ошибки глаза были закрыты (PERCLOS = 1), и чаще высокий уровень индекса закрытия глаз встречался в опытах с воздействием, чем без него, хотя средние значения по опытам и не демонстрируют значимых различий. Данный параметр важен для разделения ошибок, совершенных по невниманию и в силу засыпания, поскольку при отвлечении он может остаться неизменным. В случае проведенных экспериментов значительная часть ошибок была обусловлена именно дремотой и засыпанием.

Таблица 4

Значение индекса variability сердечного ритма в опытах с различными типами воздействия
[Value of heart rate variability index in experiments with different types of stimulation]

Индекс variability сердечного ритма [Heart rate variability index]	Без воздействия [No impact, experience with sleep deprivation]		Вибронакидка [Impact of vibronacid, experience with sleep deprivation]		Мятное масло [Exposure to the smell of peppermint essential oil, experience with sleep deprivation]	
	Среднее [Mean]	Стандартное отклонение [Standard deviation]	Среднее [Mean]	Стандартное отклонение [Standard deviation]	Среднее [Mean]	Стандартное отклонение [Standard deviation]
В первые две минуты работы [First two minutes after experiment start]	3,03	2,07	3,30	2,39	4,23	2,75
В течение минуты перед ошибкой [1 minute before error]	12,24	7,79	10,69	7,76	11,20	5,10
За все время работы [All experiment time]	4,07	1,75	4,63	1,85	4,82	1,78

Таблица 5

Значения индекса уровня закрытия глаз в опытах с различными типами воздействия
[Eye closure level index values in experiments with different types of stimulation]

	Без воздействия [No impact, experience with sleep deprivation]		Вибронакидка [Impact of vibronacid, experience with sleep deprivation]		Мятное масло [Exposure to the smell of peppermint essential oil, experience with sleep deprivation]	
	Среднее [Mean]	Стандартное отклонение [Standard deviation]	Среднее [Mean reaction time]	Стандартное отклонение [Standard deviation]	Среднее [Mean]	Стандартное отклонение [Standard deviation]
В начале работы [First two minutes after experiment start]	0,13	0,074	0,11	0,052	0,12	0,06
За все время работы [All experiment time]	0,13	0,06	0,12	0,054	0,12	0,05
В течение минуты перед ошибкой [1 minute before error]	0,49	0,44	0,78	0,38	0,70	0,35

Обсуждение

Результаты серии экспериментов, сравнивавших эффекты воздействия вибронакидки на кресло водителя, запаха мяты перечной и отсутствие воздействия на фоне острой депривации сна на самочувствие и эффективность работы при выполнении монотонной операторской деятельности, представлены в приложении к отчету.

Соотнесение различных оценок поведения, психофизиологических параметров и самооценки испытуемых перед опытом, в ходе работы и перед совершением ошибок позволяет описать состояние участвовавших в серии экспериментов испытуемых. Высокие параметры субъективной активности отмечались в комбинации с плохим самочувствием и сниженным настроением, что может говорить о постоянном присутствии стресса и активации не за счет восстановления во сне, а за счет стрессового ответа организма. Соотношение параметров самооценки самочувствия, активности и настроения, а также данные о сне перед опытом без депривации сна (в среднем 6,5 ч) говорят о хроническом недостатке сна и дополнительной острой депривации сна в основной серии экспериментов. Количество сна не соответствовало субъективно воспринимаемой сонливости, но отражалось в активности и во всех субъективных оценках состояния после нагрузки (проведенного эксперимента). Диссоциация реального времени сна ночью, уровня субъективной сонливости и самочувствия характерна для ситуаций хронической депривации сна и стресса и является фактором риска при вождении.

Дополнительная депривация сна не влияла на выполнение психомоторных тестов на комплекс УПДК, и уровень ошибок был достаточно высоким уже в контрольном опыте без депривации сна. Таким образом, комплекс не мог служить для отличия условий острой и хронической депривации сна. Также полученные с его помощью данные реакций не соотносились с эффективностью работы в автосимуляторе.

В рамках опыта среднее время реакции на медленно появившееся препятствие (покраснение дороги) коррелировало с общим числом ошибок в автосимуляторе.

Индекс ВСР продемонстрировал дополнительную активацию симпатической нервной системы в ходе работы по сравнению с началом опыта, что отражает преобладание активности симпатической нервной системы над парасимпатической и стрессирующее воздействие опыта на испытуемых. Значительный дополнительный рост этого индекса наблюдался

перед совершением ошибки, в особенности в опыте без воздействия, где также наблюдался наименьший индекс закрытия глаз среди опытов с депривацией сна. Эти тенденции могут указывать на различия в причинах совершенных в опытах с воздействием и без него ошибок.

В опыте без воздействия более выраженная симпатическая активация, выраженный альфа-ритм и относительно невысокий уровень PERCLOS перед совершением ошибок указывает на то, что многие из них были совершены по невнимательности, в результате отвлечения от задания. В опытах с действием вибронакидки или мятного масла перед ошибкой индекс закрытия глаз был выше, изменение индекса ЭЭГ альфа/бета и индекса ВСР – не таким выраженным. Суммарно это может говорить о переходе к дреме, где альфа-ритм начинает угасать, тета-ритм генерализуется и сигнализирует о начале перехода ко сну, и симпатическая активация становится недостаточной для борьбы со сном. Для этого может быть две причины: либо воздействия вибрации и запаха перечной мяты воспринимались как расслабляющие, и испытуемые легче переходили от отвлечения к засыпанию, либо испытуемые снижали самоконтроль над уровнем бодрствования, полагаясь на внешние сигналы для активации. Однако воздействие не было подстроено под моменты засыпания, и снижение контроля также приводило к более частому засыпанию.

Такие различия в реакциях испытуемых в данной серии опытов от полученных результатов и «ухудшение» реакций на потенциально активирующее воздействие вибрации или запаха, скорее всего, обусловлены высоким уровнем психофизиологического стресса, вызванного в том числе депривацией сна, у участвовавших в исследовании студентов медицинских специальностей.

Несмотря на различия в психофизиологических параметрах, во всех условиях суммарное количество ошибок, независимо от их причин, оставалось приблизительно одинаковым. По стабильным данным всех тестов перед опытами мы видели, что исходное состояние во всех трех опытах для всех испытуемых было близким, и, видимо, оно провоцировало близкое количество периодов сниженного уровня бодрствования в ходе работы в автосимуляторе. Но без воздействия испытуемые боролись со сном, и сниженный уровень бдительности часто приводил к отвлечению от задания, а воздействия косвенно провоцировали дополнительное снижение этого уровня и задремывание.

Различие ошибок по психофизиологическим характеристикам и причинам (отвлечение или засыпание) при сходстве их на поведенческом

уровне и потенциальной опасности последствий указывает на невозможность использования «универсального» психофизиологического индекса для детекции периодов высокого риска совершения ошибки: различные индексы могут быть более чувствительны к засыпанию или к отвлечению.

Выводы

1. По результатам опросников и выполнения тестов испытуемые находились в состоянии хронической депривации сна и хронического стресса.

2. На задействованной выборке испытуемых не удалось обнаружить статистически значимых различий между экспериментами после частичной депривации сна без дополнительного воздействия, с использованием массажной вибронакидки на кресло и периодическим распылением мятного масла раз в 10 минут.

3. Показатели PERCLOS и спектральный индекс BCP показали значительное статистически достоверное увеличение перед ошибками, однако имел место большой разброс значений, что, по нашему мнению, может быть связано с ошибками, вызванными отвлечением от выполнения задания на собственные мысли, а не засыпанием как таковым.

4. Значения физиологических показателей перед ошибками указывают на различные причины ошибок в экспериментах без воздействия, с одной стороны, и с воздействием вибромассажной накидки и мятного масла – с другой.

Библиографический список / References

Сравнение эффективности управления симулятором вождения автомобиля в ручном и полуавтоматическом режимах: поведенческий и физиологический анализ / Ткаченко О.Н., Дорохов В.Б., Дементенко В.В. и др. // Социально-экологические технологии. 2022. Т. 12. № 1. С. 62–80. DOI: 10.31862/2500-2961-2022-12-1-62-80 [Tkachenko O.N., Dorokhov V.B., Dementienko V.V. et al. Comparison of driving simulator efficiency in semi-automatic and handdriving modes: Behavioral and physiological analysis. *Environment and Human: Ecological Studies*. 2022. Vol. 12. No. 1. Pp. 62–80. (In Rus.) DOI: 10.31862/2500-2961-2022-12-1-62-80]

Ткаченко О.Н., Дорохов В.Б., Дементенко В.В. Психофизиологические аспекты поддержания оптимального уровня внимания водителей при частично автоматизированном вождении автомобиля // Социально-экологические технологии. 2020. Т. 10. № 4. С. 482–509. DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-4-482-509

[Tkachenko O.N., Dorokhov V.B., Dementienko V.V. Psychophysiological aspects of maintaining drivers' optimal attention level while driving semiautonomous cars. *Environment and Human: Ecological Studies*. 2020. Vol. 10. No. 4. Pp. 482–509. (In Rus.) DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-4-482-509]

Mahachandra M., Yassierli, Garnaby E.D. The effectiveness of in-vehicle peppermint fragrance to maintain car driver's alertness. *Procedia Manufacturing*. 2015. Vol. 4. Pp. 471–477. DOI: 10.1016/j.promfg.2015.11.064

Morgan A., Mannering F.L. The effects of road-surface conditions, age, and gender on driver-injury severities. *Accident Analysis & Prevention*. 2011. September. No. 43 (5). Pp. 1852–1863. DOI: 10.1016/j.aap.2011.04.024

Powell N.B., Chau J.K. Sleepy driving. *Medical Clinics of North America*. 2010. May. No. 94 (3). Pp. 531–40. DOI: 10.1016/j.mcna.2010.02.002.

Shiner Z., Akselrod S., Dagan Y., Baharav A. Autonomic changes during wake-sleep transition: A heart rate variability based approach. *Autonomic Neuroscience*. 2006. Vol. 130. No. 1–2. Pp. 17–27.

Tefft B.C. Acute sleep deprivation and culpable motor vehicle crash involvement. *Sleep*. 2018. Vol. 1. No. 41. Is. 10. DOI: 10.1093/sleep/zsy144.

Telpaz A., Rhindress B., Zelman I., Tsimhoni O. Haptic seat for automated driving. *Proceedings of the 7th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*. 2015. Pp. 23–30. DOI: 10.1145/2799250.2799267

Vicente J., Laguna P., Bartra A., Bailon R. Drowsiness detection using heart rate variability. *Medical & Biological Engineering & Computing*. 2016. Vol. 54. No. 6. Pp. 927–937.

Vogelpohl T., Kühn M., Hummel T., Vollrath M. Asleep at the automated wheel – Sleepiness and fatigue during highly automated driving. *Accident; Analysis and Prevention*. 2018. Vol. 126. Pp. 70–84. DOI: 10.1016/j.aap.2018.03.013

Weng J., Meng Q. Effects of environment, vehicle and driver characteristics on risky driving behavior at work zones. *Safety Science*. 2012. Vol. 50. No. 4. Pp. 1034–1042. DOI: 10.1016/j.ssci.2011.12.005

Статья поступила в редакцию 10.05.2023, принята к публикации 12.07.2023

The article was received on 10.05.2023, accepted for publication 19.07.2023

Сведения об авторах / About the authors

Ткаченко Ольга Николаевна – кандидат биологических наук; научный сотрудник лаборатории нейробиологии сна и бодрствования, Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, г. Москва

Olga N. Tkachenko – PhD in Biology; research fellow at the Laboratory of Sleep and Wakefulness Neurobiology, Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology, Russian Academy of Science, Moscow

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5100-8980>

E-mail: tkachenkoon@gmail.com

Дорохов Владимир Борисович – доктор биологических наук; заведующий лабораторией нейробиологии сна и бодрствования, Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, г. Москва

Vladimir B. Dorokhov – Dr. Hab. in Biology; head at the Laboratory of Neurobiology of Sleep and Wakefulness, Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology, Russian Academy of Science, Moscow

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3533-9496>

E-mail: vbdorokhov@mail.ru

Дементенко Валерий Васильевич – доктор технических наук; ведущий научный сотрудник лаборатории медицинской электроники, Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН, г. Москва

Valeriy V. Dementienko – Dr. Hab. in Engineering Science; leading research fellow at the Laboratory of Medical Electronics, Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Science, Moscow

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0488-7334>

E-mail: dementienko@neurocom.ru

Гандина Евгения Олеговна – младший научный сотрудник лаборатории нейробиологии сна и бодрствования, Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, г. Москва

Eugenia O. Gandina – junior research fellow at the Laboratory of Neurobiology of Sleep and Wakefulness, Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology RAS, Moscow, Russian Federation

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7803-0873>

E-mail: gandina.e@mail.ru

Арсеньев Глеб Николаевич – младший научный сотрудник лаборатории нейробиологии сна и бодрствования, Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, г. Москва

Gleb N. Arsenyev – junior research fellow at the Laboratory of Neurobiology of Sleep and Wakefulness, Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology RAS, Moscow, Russian Federation

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3723-7354>

E-mail: byron100z@gmail.com

Таранов Антон Олегович – младший научный сотрудник лаборатории нейробиологии сна и бодрствования, Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, г. Москва

Anton O. Taranov – junior research fellow at the Laboratory of Neurobiology of Sleep and Wakefulness, Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology RAS, Moscow, Russian Federation

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4905-8249>

E-mail: psy.msu.ru@gmail.com

Пучкова Александра Николаевна – кандидат биологических наук; старший научный сотрудник лаборатории нейробиологии сна и бодрствования, Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, г. Москва

Alexandra N. Puchkova – PhD in Biology; senior research fellow at the Laboratory of Sleep and Wakefulness Neurobiology, Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology, Russian Academy of Science, Moscow

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2292-6475>

E-mail: puchkovaan@gmail.com

Бакирова Диана Руслановна – лаборант лаборатории нейробиологии сна и бодрствования, Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, г. Москва

Diana R. Bakirova – research assistant at the Laboratory of Neurobiology of Sleep and Wakefulness, Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology RAS, Moscow, Russian Federation

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2057-4269>

E-mail: dianabakirova1996@yandex.ru

Свешников Дмитрий Сергеевич – доктор медицинских наук; доцент кафедры нормальной физиологии Медицинского института, Российский университет дружбы народов, г. Москва

Dmitriy S. Sveshnikov – Dr. Hab. in Medical Sciences; Associate Professor at the Department of Normal Physiology of the Medical Institute, Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russian Federation

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1050-7871>

E-mail: sveshnikov_ds@rudn.university

Заявленный вклад авторов

О.Н. Ткаченко – общее руководство, разработка дизайна эксперимента, анализ данных, участие в написании статьи

В.Б. Дорохов – разработка дизайна эксперимента, анализ данных, участие в написании статьи

В.В. Дементьенко – обработка данных УПДК, анализ данных, участие в написании статьи

Е.О. Гандина – проведение экспериментов

Г.Н. Арсеньев – проведение экспериментов, техническое обслуживание экспериментальной установки

А.О. Таранов – проведение экспериментов, обработка данных опросников

А.Н. Пучкова – проведение экспериментов, анализ данных

Д.Р. Бакирова – проведение экспериментов

Д.С. Свешников – организация проведения экспериментов

Contribution of the authors

O.N. Tkachenko – general guidance, development of the design of the experiment, data analysis, participation in writing the article

V.B. Dorokhov – development of the design of the experiment, data analysis, participation in the writing of the article

V.V. Dementienko – data processing of the UPDK, data analysis, participation in writing the article

E.O. Gandina – conducting experiments

G.N. Arseniev – conducting experiments, maintenance of the experimental facility

A.O. Taranov – conducting experiments, processing questionnaire data

A.N. Puchkova – conducting experiments, data analysis

D.R. Bakirova – conducting experiments

D.S. Sveshnikov – organization of experiments

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

All authors have read and approved the final manuscript