Вестник Московского университета. Серия 14. Психология. 2026. Т. 49, № 1. С. 246–272
Lomonosov Psychology Journal. 2026. Vol. 49, No. 1. P. 246–272

ПСИХОЛОГИЯ — ПРАКТИКЕ / PSYCHOLOGY TO PRACTICE

Научная статья / Research Article
https://doi.org/10.11621/LPJ-26-10
УДК/UDC 159.91

Вероятность совершения ошибочных действий оперативным персоналом АЭС: роль длительности и интенсивности рабочей нагрузки

Е.Д. Чернецкая [1], Е.В. Леонова [1] ✉, Ю.В. Бессонова [1, 3], Л.О. Андрюшина [2]

[1] Техническая академия Росатома, Обнинск, Российская Федерация,
[2] АО «Концерн Росэнергоатом», Москва, Российская Федерация
[3] Институт психологии Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

✉ e.v.leonova@mail.ru

Резюме
Актуальность. Для обоснования оценки надежности оперативного персонала атомной электростанции (АЭС) в условиях возрастающей нагрузки необходимо конкретизировать существующие общие закономерности динамики функционального состояния в зависимости от рабочей и сенсорной нагрузки применительно к специфике труда оператора АЭС.
Цель. Определение особенностей влияния психофизиологической надежности на вероятность ошибок оперативного персонала АЭС.
Выборка. Оперативный персонал блочного пульта управления АЭС в количестве 40 человек (мужчины).
Методы. Методы оценки показателей функционального состояния с использованием аппаратно-программного комплекса ЭСМО. Анализ табеля рабочего времени. Анализ информации о количестве общих, рабочих и аварийных сигналов в течение смен. Методы статистического анализа данных с использованием статистического пакета Statistica v.13 и электронных таблиц Excel: вычисление описательных статистик, оценка закона распределения признаков, стандартизация данных; ANOVA с post-hoc анализом (η^2_p, Tukey HSD).

Результаты. Установлено, что вероятность ошибок оперативного персонала оказалась более тесно взаимосвязанной с показателями, отражающими функциональное состояние, чем с характеристиками рабочей нагрузки. Из них вероятность пропуска сигнала более тесно взаимосвязана с показателями состояний и влиянием сенсорной нагрузки, вероятность ошибочного действия — и с функциональным состоянием, и с большим количеством факторов рабочей нагрузки. Установлено также влияние уровня сенсорной нагрузки на функциональное состояние оператора. Низкий уровень сенсорной нагрузки позволяет поддерживать оптимальные показатели времени реакции и адаптации к трудовой деятельности до 5 рабочих дней, средний уровень — сокращает длительность периода оптимальной работоспособности, высокая сенсорная нагрузка вызывает избыточную активацию и рост психической напряженности уже в первый рабочий день.
Выводы. Установлено, что четыре непрерывных рабочих дня подряд являются критической длительностью непрерывной работы, не сказывающейся на функциональном состоянии оператора. С пятого дня накопленное утомление существенно влияет на скоростные показатели реакции, а главное — на степень сознательного контроля реакции, а к восьмому дню компенсаторные функциональные резервы истощаются. Отдельной линией будущих исследований является анализ влияния отработанных в лабораториях психофизиологического обеспечения АЭС методов психологической и психофизиологической поддержки функциональной надежности работников.

Ключевые слова: психология труда, вероятность совершения ошибки, функциональное состояние, психофизиологическая надежность, сложная сенсомоторная реакция (ССМР), ошибка реагирования, пропуск сигнала, рабочая нагрузка, сенсорная нагрузка, оперативный персонал, атомная электростанция

Благодарности. Авторы благодарят за помощь в предобработке данных, составлении базы данных и подготовке данных для анализа доцента НИЯУ МИФИ к.т.н. Мирзеабасова Олега Ахметбековича.

Для цитирования: Чернецкая, Е.Д., Леонова, Е.В., Бессонова, Ю.В., Андрюшина, Л.О. (2026). Вероятность совершения ошибочных действий оперативным персоналом АЭС: роль длительности и интенсивности рабочей нагрузки. *Вестник Московского университета. Серия 14. Психология, 49*(1), 246–272. https://doi.org/10.11621/LPJ-26-10

Probability of Erroneous Actions by NPP Operating Personnel: The Role of Duration and Intensity of Workload

Elena D. Chernetskaya [1], Elena V. Leonova [1] ✉, Yulia V. Bessonova [1, 3], Larisa O. Andryushina [2]

[1] Rosatom Technical Academy, Obninsk, Russian Federation

[2] Rosenergoatom JSC, Moscow, Russian Federation

[3] Institute of Psychology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

✉ e.v.leonova@mail.ru

Abstract

Background. To substantiate the reliability assessment of the operating personnel at a nuclear power plant (NPP) under conditions of increasing load, it is necessary to specify the existing general patterns of the functional state dynamics depending on the work and sensory load in relation to the specifics of the work of the NPP operator.

Objective. The aim is to determine the influence of psychophysiological reliability on the probability of errors in NPP operating personnel.

Study Participants. The operational personnel of the nuclear power plant consisting of 40 men.

Methods. Methods for assessing functional state indicators were applied using the hardware and software complex of the Electronic Health Monitoring System. Timesheet analysis, as well as the analysis of the number of general, working and emergency signals during shifts were conducted. Methods of statistical data analysis involved the Statistica statistical package and Excel spreadsheets: descriptive statistics, assessment of the distribution of features, data standardisation; ANOVA and post-hoc analysis (η^2_p, Tukey HSD).

Results. It was found that the probability of errors made by operational personnel was more closely related to the indicators reflecting the functional state than to the characteristics of the workload. Of these, the probability of mission is more closely related to the indicators of states and the influence of sensory load. The probability of an Erroneous Response is related to both the functional state and a large number of workload factors. The influence of the level of sensory load on the functional state of the operator was also established. A low level of sensory load allows maintaining optimal reaction time and adaptation to work activity for up to 5 working days. An average level of sensory load reduces the duration of the

optimal performance period, while a high sensory load causes excessive activation and an increase in mental stress even on the first work day.
Conclusions. Four consecutive uninterrupted work days are the critical duration of uninterrupted work that does not affect the functional state of the operator. From the fifth day, accumulated fatigue significantly affects the reaction speed indicators, and most importantly, the degree of conscious control of the reaction. By the eighth day, compensatory functional reserves are depleted. The direction of future research is the analysis of the influence of methods of psychological and psychophysiological support of the functional reliability of workers, developed in the NPP's psychophysiological laboratories.

Keywords: occupational psychology, error probability, functional state, psychophysiological reliability, complex sensory-motor reaction (CSMR), erroneous response, omission, work load, sensory load, operational personnel, nuclear power plant

Acknowledgements. The authors are grateful to Oleg A. Mirseabasov, PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the National Research Nuclear University MEPhI, for the assistance in data preprocessing, database compilation and data preparation for analysis.

For citation: Chernetskaya, E.D., Leonova, E.V., Bessonova, Yu.V., Andryushina, L.O. (2026). Probability of erroneous actions by NPP operating personnel: the role of duration and intensity of workload. *Lomonosov Psychology Journal, 49*(1), 246–272. https://doi.org/10.11621/LPJ-26-10

Введение

Понятие надежности человека-оператора отражает безотказность, безошибочность и своевременность действий, направленных на достижение конкретных профессиональных целей в процессе взаимодействия с техникой и другими специалистами (Бодров, Орлов, 1998). Обзор исследований аварийности в авиации показал, что ошибки по человеческим факторам составляют от 30 до 70% летных происшествий (Козлов, 2024), ошибки взаимодействия человека-оператора с интерфейсом признаются причиной 80% морских инцидентов (Liu et al., 2021), от 60 до 90% и более аварий в области безопасности дорожного движения (Kosch et al., 2022) и свыше половины происшествий с беспилотными летательными аппаратами вызваны ошибочными решениями операторов (Giese et al., 2013).

Выявлен ряд устойчивых проблем человеческого фактора. Основные из этих проблем сосредоточены в области восприятия

и понимания информации, распределения внимания оператора, обеспечения ситуационной осведомленности (Lynch et al., 2022), когнитивной обработкой информации (Abu-Alqumsan et al., 2017), динамики сенсомоторных реакций под влиянием факторов среды и утомления (Комаров, 2014; Зибарев и др., 2020). На примере работы атомных электростанций показано, что низкая осведомленность операторов способствует повышению вероятности их ошибок при взаимодействии с интерфейсом за счет некорректного считывания и интерпретации воспринимаемой информации (Weyers et al., 2010). Процессы восприятия и понимания человеком-оператором информации являются основой осознания ситуации и прогнозирования ее будущего состояния. При управлении сложными процессами человеку-оператору необходимо отслеживать показатели многочисленных процессов и параметров, выявлять закономерности между ними, чтобы сохранять информированность о функционировании системы и прогнозировать будущие изменения.

Теоретическое основание

В отечественной науке принято различать профессиональную надежность, характеризующую вероятность выполнения поставленной задачи в течение определенного времени, с допустимой точностью, при сохранении заданных параметров работающей системы; функциональную надежность, отражающую уровень регуляции физиологических, психофизиологических, психических процессов, объем резервных возможностей обеспечивать оптимальное функциональное состояние и выполнять деятельность под влиянием усложняющих факторов среды и развития неблагоприятных состояний; и личностную надежность как совокупность личностных свойств, обеспечивающих готовность работников выполнять деятельность стабильно и безошибочно (Бодров, 2009; Сериков, 2015; Овчаров, 2005; Козлов, 2024 и др.). Данные типы надежности тесно взаимосвязаны.

Между совокупностью состояний функциональных систем и надежностью имеется непосредственная причинно-следственная связь, что и определило использование понятия «функциональная надежность» человека в профессиональной деятельности. Данное свойство проявляется в адекватном требованиям деятельности уровне состояния и развития функциональных систем и механизмов их регуляции в нормальных и экстремальных условиях. Функциональная надежность является одним из показателей профессиональной

пригодности субъекта деятельности и зависит от особенностей развития функциональных систем и устойчивости к проявлениям их крайних форм (стресс, переутомление, психическая дезадаптация, пограничные состояния, состояние здоровья в целом и т.п.).

Для прогнозирования ошибок в деятельности важно оценивать функциональное состояние не только в момент совершения ошибки, но и до начала выполнения деятельности. При этом психофизиологические показатели информативны для предсказания изменения функционального состояния на неоптимальное.

В литературе встречается множество способов оценки функционального состояния. Несмотря на то, что электроэнцефалография является признанным золотым стандартом для измерения состояния специалистов в процессе деятельности, для прикладных целей требуются более простые в регистрации, расшифровке и интерпретации биомаркеры. Такими методами, подтвердившими свою валидность, являются оценка результативности выполнения сенсомоторных реакций и оценка вариабельности сердечного ритма. Время реакции складывается из латентного компонента, включающего, в свою очередь, сенсорный компонент (время восприятия сенсорной информации) и когнитивный компонент (от опознания сенсорного образа, сличения его с хранящимся в памяти образцом, принятия решения, формирования программы движения и прохождения импульса к мышцам), и моторного компонента (время выполнения движения, от начала моторной реакции до времени ее окончания). Длительность сенсомоторной реакции (СМР) считается связанной не с работой анализаторов, а с состоянием центральных структур, поэтому используется как маркер функционального состояния ЦНС, отражает уровень активации нервной системы и подвижность нервных процессов (Шутова, Муравьева, 2013).

Скоростные и точностные показатели сенсомоторных реакций активно применяются в качестве оценочных и прогнозных маркеров уровня психической напряженности и оценки профессиональных рисков: оценки работоспособности операторов по показателю времени простой СМР (Захаров и др., 1988), оценки работоспособности и утомления для операторов слежения (Осипенко, 2015), диагностики рабочего утомления у машинистов (Капцов, Кузьмин, 2015), для оценки комбинированного воздействия утомления, циркадных ритмов, производственного стресса на эффективность умственной деятельности операторов АЭС (Bobko et al., 1998).

К настоящему времени накоплены результаты исследований, достоверно подтверждающие применение показателей вариабельности сердечного ритма (ВСР) в качестве информативного предиктора совершения ошибочных действий на фоне изменения вегетативной регуляции при утомлении, стрессе, эмоциональном возбуждении и т.д. Успешность применения показателей ВСР была реализована в нескольких критически важных для безопасности видах деятельности операторов, в том числе на атомных станциях (Gao et al., 2013; Kim et al., 2018). Ряд данных показывает, что ВСР является одним из наиболее точных и информативных показателей утомления и сонливости, оценки уровня тревожности и стресса, установлены корреляции между когнитивной нагрузкой и индексами ВСР.

Таким образом, для обоснования оценки надежности оперативного персонала АЭС (вероятности совершения ошибки-промаха) с учетом увеличения нагрузки необходимо конкретизировать применительно к специфике работы оператора АЭС имеющиеся общие закономерности динамики функционального состояния человека-оператора в различных условиях (в том числе с учетом предшествующего графика труда и отдыха), а также проанализировать количество ошибок, совершенных персоналом смены с учетом предшествующего графика труда и отдыха.

Цель исследования. Определение особенностей влияния психофизиологической надежности на вероятность ошибок оперативного персонала АЭС.

Объект исследования. Психофизиологическая надежность оперативного персонала АЭС.

Предмет исследования. Вероятность совершения ошибочных действий оперативным персоналом АЭС в зависимости от длительности и интенсивности рабочей нагрузки.

Задачи исследования:

1. Определить особенности влияния рабочей нагрузки на надежность оператора.

2. Определить особенности влияния сенсорной нагрузки на функциональную надежность оператора.

Методы исследования

I. Методы оценки показателей функционального состояния с использованием АПК ЭСМО: среднее время реакции, мс (СВР); стандартное отклонение, мс (SD); пропуски, количество; ошибочная

реакция; ПАРС — показатель активности регуляторных систем по показателям вариабельности сердечного ритма. Показатели измерялись перед началом, в середине и перед окончанием рабочей смены в течение четырех месяцев.

II. Анализ табеля рабочего времени: для каждого работника оценивались количество рабочих дней, ночных смен, рабочих дней без выходных.

III. Анализ информации о количестве общих, рабочих и аварийных сигналов в течение смен. Использовалась предоставленная информация о количестве общих, рабочих, аварийных сигналов в течение каждой смены.

IV. Методы статистического анализа данных.

Анализ и визуализация данных для решения различных задач исследования производились с использованием статистического пакета Statistica и электронных таблиц Excel. Использовались следующие методы статистического анализа: вычисление описательных статистик, оценка закона распределения признаков, стандартизация данных; ANOVA с post-hoc анализом (η^2_p, Tukey HSD).

1. Вычисление описательных статистик, оценка закона распределения признаков, стандартизация данных (перевод в Z-оценки).

2. Методы параметрической статистики: критерий χ^2 Пирсона, F-критерий Фишера.

3. Методы многомерной статистики: дисперсионный анализ (одномерный и многомерный), регрессионный анализ.

Выборка

Оперативный персонал в количестве 40 человек (мужчины). С целью соблюдения анонимности данные о возрасте и результатах ежегодного психофизиологического обследования респондентов были предоставлены в обобщенном виде, в целом по выборке.

Результаты исследования

В соответствии с представлением о надежности профессиональной деятельности как интегральном конструкте, включающем профессиональную (результативную), функциональную и личностную надежность, первой задачей являлось изучение результативных показателей надежности деятельности под влиянием рабочей нагрузки.

Поскольку деятельность специалистов операторского профиля располагает очень ограниченным набором объективных показателей

ее результативности и практически отсутствуют показатели профессиональной надежности, результаты оценки сенсомоторной реакции в данном исследовании выступали в качестве единственного показателя поведенческих реакций респондентов.

Тест сенсомоторной реакции включал 48 проб, из которых 16 были предъявлением значимого стимула, а 32 — пустыми. Вероятность ошибки оценивалась как частотная вероятность, то есть соотношение количества тех или иных событий (пропусков, ошибок) к общему количеству проб. В силу большого количества проб как в целом по выборке, так и для каждого респондента, относительная частота регистрации событий приближается к частотной вероятности, что и позволило нам использовать термин вероятность для характеристики событий.

На Рисунке 1 представлена диаграмма вероятности ошибок двух типов (пропуск и ошибочная реакция) у респондентов на протяжении всего периода исследования. Видно, что пропуски и ошибки составляют самостоятельные классы событий, для одних респондентов более свойственны пропуски сигнала, для других — ошибочные реакции. Значения критерия Фишера $F(39, 4806) = 35{,}66$, $p < 0{,}00$, partial eta-squared (η^2_p) = 0,22 (вероятность пропуска) и $F(39, 4806) = 22{,}99$, $p < 0{,}00$, partial eta-squared (η^2_p) = 0,16 (вероятность ошибочной реакции) свидетельствуют о статистически достоверном различии

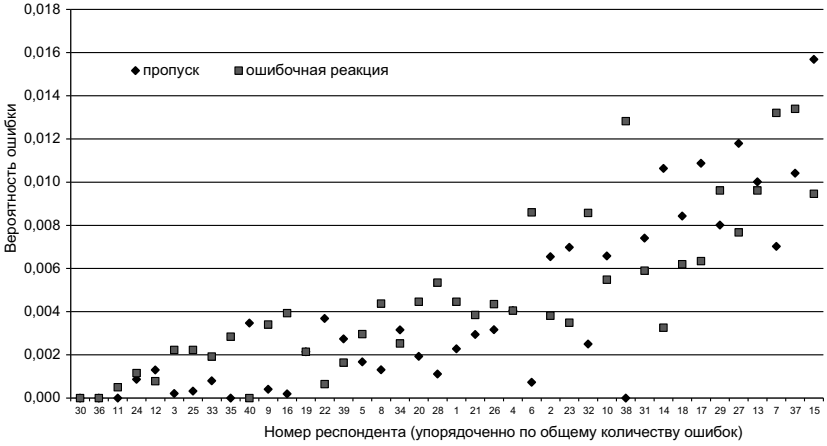

Рисунок 1

Вероятность совершения респондентами ошибок пропуска и ошибочных реакций

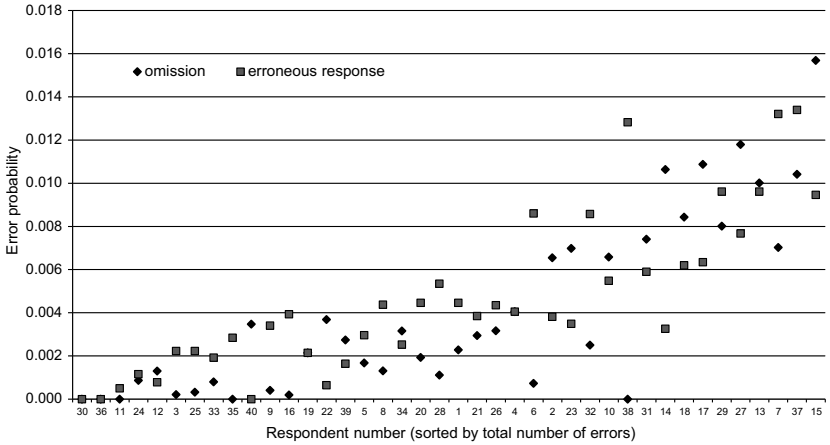

Figure 1

Probability of Omission and Erroneous Response

респондентов между собой по частоте совершения тех или иных ошибочных действий.

Изменение точностных показателей сенсомоторной реакции в зависимости от длительности рабочей нагрузки — количества рабочих дней после отдыха (день смены) — приведено на Рисунке 2.

Во-первых, отметим увеличение вероятности совершения как ошибочных реакций, так и пропусков сигнала в зависимости от графика работы: минимальная вероятность отмечалась в первые три дня после отдыха, с четвертого дня вероятность ошибок постепенно увеличивается. Во-вторых, рост количества ошибочных действий на сутки опережает увеличение количества пропусков, что связано с разными физиологическими механизмами возникновения этих двух типов показателей точности реакции и влиянием развивающегося утомления, в первую очередь сказывающегося на концентрации произвольного внимания и снижении его точности.

Достоверность влияния количества рабочих дней на точностные показатели была проверена с помощью Repeated Measures ANOVA для связных выборок с контролем побочного фактора «респондент»: для вероятности пропуска ($F(14, 9642) = 53{,}34$, $p = 0{,}00$, partial eta-squared (η^2_p) = 0,17), для вероятности ошибки ($F(14, 9642) = 75{,}58$, $p = 0{,}00$, partial eta-squared (η^2_p) = 0,19). Post-hoc анализ подтвердил, что количество пропусков повышается на пятый день по сравнению

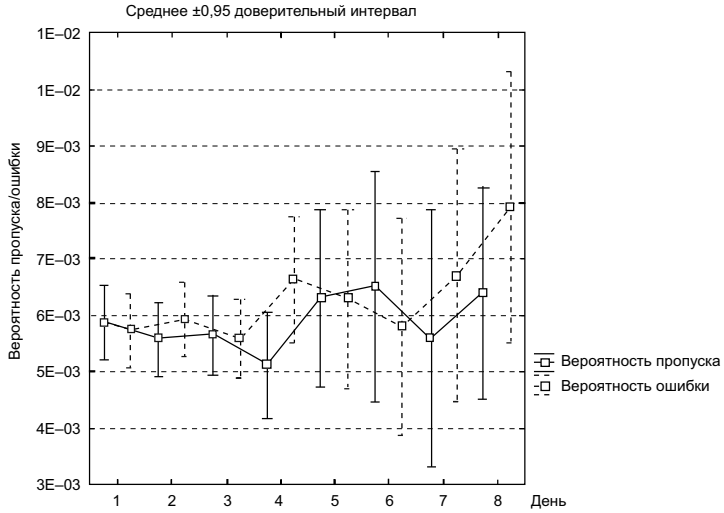

Рисунок 2

Вероятность пропусков и ошибок при выполнении сенсомоторной пробы в зависимости от количества рабочих дней подряд

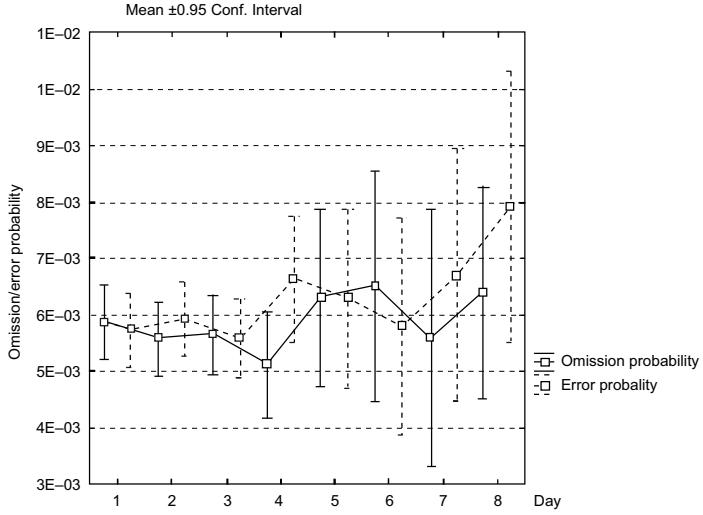

Figure 2

Probability of Omission and Erroneous Response depending on the number of consecutive work days

с предыдущими днями ($p < 0,05$), а вероятность ошибочных реакций увеличивается на четвертый день ($p < 0,03$). Поскольку не все респонденты имели данные за все 8 дней, и размеры выборок за каждый день сильно различались, для множественных сравнений применялся критерий Тьюки для неравных выборок (Unequal N HSD) (Таблица 1).

Таблица 1
Различия вероятности ошибок пропуска и ошибочных реакций в зависимости от переменной «день графика»

Сравниваемые измерения, день	Ошибка пропуска		Ошибочная реакция	
	q	p	q	p
1 и 2	0,75	0,88	0,13	0,90
2 и 3	0,10	0,54	0,39	0,71
3 и 4	0,58	0,59	2,18	0,03
4 и 5	2,27	0,05	0,14	0,88
5 и 6	0,01	0,96	0,39	0,69
6 и 7	0,76	0,89	0,37	0,73
7 и 8	0,95	0,61	1,03	0,21

Table 1
Differences in the probability of Omission and Erroneous Response as a function of the variable "Day of Schedule"

Compared measurements, day	Omission		Erroneous Response	
	q	p	q	p
1 and 2	0.75	0.88	0.13	0.9
2 and 3	0.1	0.54	0.39	0.71
3 and 4	0.58	0.59	2.18	0.03
4 and 5	2.27	0.05	0.14	0.88
5 and 6	0.01	0.96	0.39	0.69
6 and 7	0.76	0.89	0.37	0.73
7 and 8	0.95	0.61	01.03	0.21

На Рисунке 3 и в Таблице 2 представлены изменения точностных показателей сенсомоторных проб на этапах предсменного контроля, измерения реакции в середине смены и после окончания смены. Вероятность совершения ошибочных действий возрастает достоверно в первой половине смены как для пропуска сигнала ($F(2, 4843) = 83,26$; $p < 0,00$, partial eta-squared ($\eta p2$) = 0,20), так и для ошибочной реакции

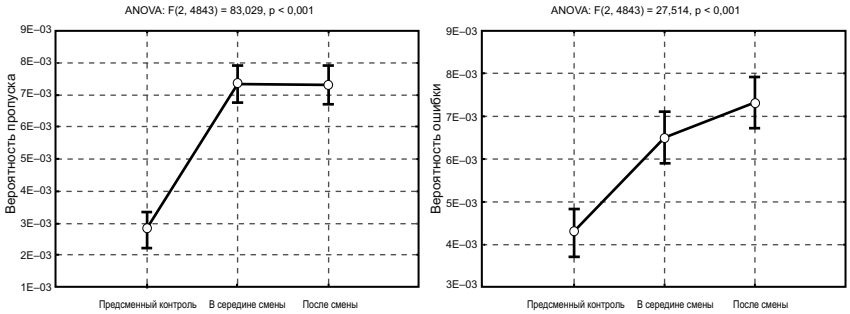

Рисунок 3

Вероятность пропусков и ошибок при выполнении сенсомоторной пробы в зависимости от времени измерения

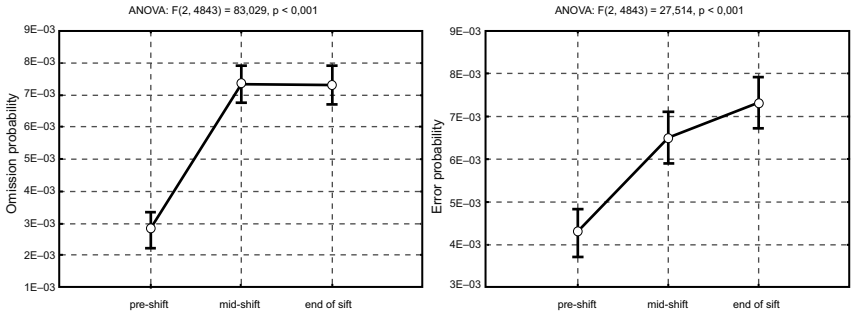

Figure 3

Probability of Omission and Erroneous Response depending on the time of measurement

Таблица 2
Различия вероятности пропусков и ошибок в зависимости от переменной «время измерения»: 1 — предсменный контроль, 2 — в середине смены, 3 — по окончании смены

Сравниваемые измерения, день	Ошибка пропуска		Ошибочная реакция	
	q	p	q	p
1 и 2	11,97	0,00	5,65	0,00
2 и 3	0,17	0,98	1,58	0,20

Table 2
Differences in the probability of Omission and Erroneous Response depending on the time of measurement: 1 — pre-shift, 2 — mid-shift, 3 — end of shift

Compared measurements, day	Omission		Erroneous Response	
	q	p	q	p
1 and 2	11.97	0.00	5.65	0.00
2 and 3	0.17	0.98	1.58	0.2

(F(2, 4843) = 26,55; p < 0,00, partial eta-squared (ηp2) = 0,07). Post-hoc анализ (Unequal N HSD) подтвердил увеличение вероятности пропусков (p < 0,00) и ошибочных реакций (p < 0,00) в первой половине смены между предсменным контролем и в середине смены, но не во второй половине смены.

К влиянию текущей рабочей нагрузки в течение смены вероятность пропуска оказывается более чувствительной, в отличие от длительности нагрузки (рабочий день по графику). Вероятность совершения ошибочного действия также достоверно повышается к середине смены и, на уровне тенденции, немного увеличивается к ее окончанию. Различия между показателями предсменного контроля и повышение вероятности как пропусков, так и ошибок к середине смены являются одним из наиболее весомых факторов рабочей нагрузки, который проявляется вне зависимости от типа смены (утренняя, вечерняя, ночная) и от рабочего дня по графику.

Характер распределения данных о количестве ошибочных действий в течение смены по результатам предсменного контроля, обследования в середине смены и по окончании смены отражает нелинейность распределения данных в случае как вероятности ошибок, так и пропусков сигнала, представлен на Рисунке 4.

Выявлено достоверное повышение вероятности ошибки пропуска к середине и концу смены по сравнению с предсменным контролем (Таблица 3). Тип смены — утренняя, вечерняя или ночная — оказывает незначительное влияние на вероятность появления пропуска сигнала (F(4, 4837) = 3,15; p < 0,00, partial eta-squared (η^2_p) = 0,03), но не ошибочного действия: вероятность пропуска сигнала повышается в утреннюю и ночную смены уже к середине смены и остается высокой вплоть до ее окончания. Также не было установлено взаимодействия факторов «времени измерения» (предсменный контроль, в середине смены, по окончании смены) и типа смены (утренняя, вечерняя, ночная) (F(4, 4837) = 0,94; p < 0,44).

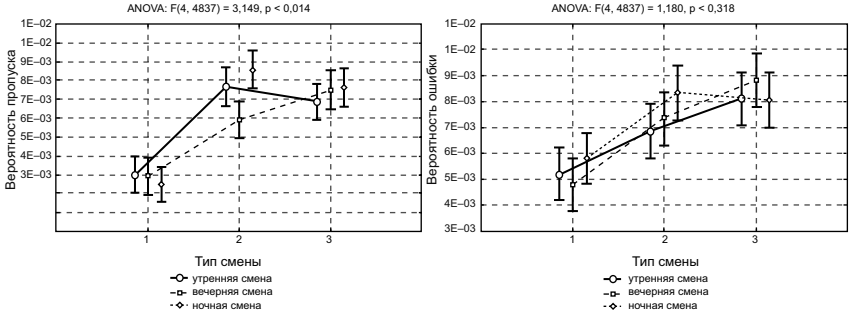

Рисунок 4

Вероятность пропусков и ошибок при выполнении сенсомоторной пробы в зависимости от типа смены (утренняя, вечерняя, ночная)

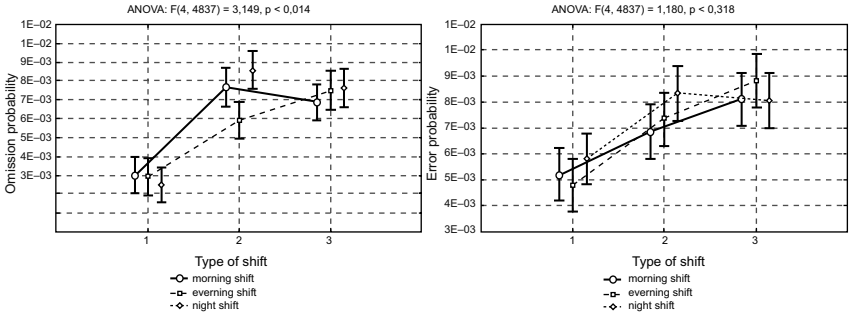

Figure 4

Probability of Omissions and Errors depending on the type of shift (morning, evening, night)

Далее нами было проанализировано влияние интенсивности рабочей нагрузки на вероятность различного типа ошибок оператора. Было выделено 10 уровней сенсорной нагрузки (по процентилям). Оценка сенсорных нагрузок труда операторов представлена в Таблице 4, расчеты плотности сигналов разного типа (кол-во/час) рассчитаны усредненно, поскольку смены могут существенно различаться по уровню рабочей нагрузки. Однако даже такое условное рассмотрение плотности основных — рабочих — сенсорных сигналов позволяет отнести труд операторов согласно нормативам (более 300 в среднем за час работы) к категории напряженного труда II степени.

Таблица 3
Различия вероятности пропусков и ошибок в зависимости от переменной «тип смены»: 1 — утренняя, 2 — вечерняя, 3 — ночная (ANOVA)

Сравниваемые измерения	Ошибка пропуска		Ошибочная реакция	
	F	p	F	p
1 и 2	3,22	0,04	3,07	0,05
2 и 3	2,91	0,05	данные неполные	данные неполные

Table 3
Differences in the probability of Omission and Erroneous Response depending on the type of shift: 1 — morning, 2 — evening, 3 — night (ANOVA)

Compared measurements	Omission		Erroneous Response	
	F	p	F	p
1 and 2	3.22	0.04	3.07	0.05
2 and 3	2.91	0.05	no data	no data

Таблица 4
Плотность сенсорных сигналов в смену и в среднем за час рабочего времени

	Общее количество сенсорных сигналов	в том числе		
		шум	рабочие	аварийные
Количество сигналов/смена	min 26 068 max 130 980 M = 53 650 Me = 49 238	min 24 593 max 119 158 M = 50 399 Me = 45 807	min 1475 max 11 822 M = 3252 Me = 2898	min 0 max 703 M = 46 Me = 16
Количество сигналов/час	min 3258,5 max 16 372,5 M = 6706,3	min 3075,1 max 14 894,8 M = 6299,9	min 184,4 max 1477,8 M = 406,5	min 0 max 87,9 M = 5,8

Table 4
Density of sensory signals per shift and on average per hour of working time

	Total number of sensory signals	including		
		background noise	working signals	emergency signals
Number of signals/shift	min 26 068 max 130 980 M = 53 650 Me = 49 238	min 24 593 max 119 158 M = 50 399 Me = 45 807	min 1475 max 11 822 M = 3252 Me = 2898	min 0 max 703 M = 46 Me = 16
Number of signals/hour	min 3258.5 max 16 372.5 M = 6706.3	min 3075.1 max 14 894.8 M = 6299.9	min 184.4 max 1477.8 M = 406.5	min 0 max 87.9 M = 5.8

В связи с плотностью сенсорных сигналов возникает проблема детекции значимого сигнала из шума. По плотности сенсорного потока смены могут различаться, в соответствии с представленными данными минимального и максимального количества общих сигналов, практически в 6 раз. Кроме того, плотность сенсорных сигналов значимо различается в зависимости от типа смены: в утреннюю смену плотность сигналов значимо выше.

Было установлено, что величина сенсорной нагрузки является значимым фактором, определяющим возрастание вероятности пропуска сигнала ($F(9, 4786) = 2{,}29$, $p < 0{,}02$; $\eta^2_p = 0{,}003$) и вероятности ошибочной реакции ($F(9, 4786) = 2{,}06$, $p < 0{,}03$; $\eta^2_p = 0{,}002$) по мере увеличения сенсорной плотности сигналов.

Зашумленность рабочих и аварийных сигналов оказалась значимым предиктором повышения вероятности как пропусков сигнала ($F(9, 4780) = 2{,}69$; $p < 0{,}004$; $\eta^2_p = 0{,}005$), так и ошибочных реакций ($F(9, 4780) = 2{,}15$; $p < 0{,}02$; $\eta^2_p = 0{,}005$), влияние сенсорной нагрузки на результативную надежность начинает сказываться, только когда количество сигналов начинает превышать уровень 50 000 шумовых незначимых сигналов в смену.

По результатам измерений в середине смены и в конце нее, вероятность пропуска значимого сигнала достоверно различалась в зависимости от плотности рабочих сигналов ($F(10, 4757) = 6{,}76$; $p < 0{,}03$), еще сильнее в зависимости от плотности аварийных сигналов ($F(10, 4757) = 9{,}25$; $p < 0{,}01$) и степени зашумленности рабочего сигнала ($F(10, 4757) = 10{,}27$; $p < 0{,}01$). Вероятность ошибочного действия в середине и конце смены оказалась более подвержена влиянию сенсорной нагрузки и возрастала в зависимости от общей плотности сенсорного потока ($F(10, 4757) = 14{,}88$; $p < 0{,}005$), плотности шумовых сигналов ($F(10, 4757) = 14{,}88$; $p < 0{,}005$), плотности аварийных сигналов ($F(10, 4757) = 13{,}69$; $p < {,}008$), а также зашумленности как рабочего сигнала ($F(10, 4757) = 7{,}60$; $p < 0{,}10$), так и аварийного сигнала ($F(10, 4757) = 11{,}59$; $p < 0{,}02$). Но ни в одном случае не было обнаружено взаимодействие факторов «время измерения» (контроль в середине смены или в конце смены) и интенсивности сенсорной нагрузки.

Таким образом, влияние сенсорной рабочей нагрузки на вероятность ошибочных реакций дифференцированно. Вероятность пропуска менее чувствительна к плотности сенсорного потока, чем вероятность ошибочной реакции, что логично объясняется необходимостью центральной, когнитивной переработки поступающего сигнала при выборе ответного действия, тогда как пропуск сигнала

связан с детекцией, детерминируется преднастройкой органов чувств и общим уровнем активации.

Среди всех сенсорных сигналов наиболее сильное влияние на снижение надежности оказывает количество аварийных сигналов как основной показатель напряженности рабочей смены, более информативный, чем общее количество сигналов и количество рабочих сигналов.

Обсуждение результатов

Обзор исследований функциональной надежности представителей операторской деятельности (Сериков, 2015; Halomoan et al., 2023; Wang et al., 2024 и др.) показал, что снижение функциональной надежности лежит в основе большого количества негрубых нарушений и основное количество происшествий по причине человеческого фактора связано со снижением бдительности, основным типом ошибок оператора являются ошибки по типу пропуска сигнала. В нашей работе были получены данные, что респонденты совершают примерно одинаковое количество ошибок по типу пропуска сигнала и ошибочных действий реакции на неправильный стимул. Эти результаты могут быть связаны с разными психическими процессами, обеспечивающими возникновение ошибочных реакций разного типа: пропуск реакции возникает при снижении уровня бдительности за счет преобладания вагусной регуляции и снижения концентрации произвольного внимания, а ошибочная реакция на стимул связана с влиянием утомления на когнитивные процессы, переключаемость и контроль импульсивности.

На основании выводов, полученных при разработке автоматизированных адаптивных систем помощи операторам (Wilson, Russell, 2003; Havenith, 2004 и др.), в исследовании была заложена идея мультимодальной регистрации психофизиологических показателей, отражающих все уровни функциональной системы обеспечения деятельности: активационный, когнитивный, поведенческий. Другим теоретическим базисом исследования послужило представление о функциональных системах, которые, с одной стороны, являются факторами обеспечения эффективности профессиональной деятельности, а с другой — сами являются производной от уровня нагрузки и резервов организма и психики (Анохин, 1973; Леонова, Медведев, 1981).

Показано, что вероятность ошибок обоих типов (пропуск, ошибочное действие) оказалась более тесно взаимосвязанной с показателями,

отражающими функциональное состояние, чем с характеристиками рабочей нагрузки. Вероятность пропуска сигнала более тесно взаимосвязана с общим активационным уровнем и влиянием сенсорной нагрузки, тогда как вероятность ошибочного действия является более сложной переменной, поскольку более подвержена влиянию и функционального состояния, и большего количества факторов рабочей нагрузки. Под влиянием рабочей нагрузки пропуски сигнала появляются уже к середине первого рабочего дня и отмечаются в 10% случаев, на третий день повышенное количество пропусков сигнала регистрируется уже на этапе предсменного контроля.

Повышение вероятности ошибочных реакций отмечается чуть позднее, к четвертому-пятому рабочему дню, в зависимости от индивидуальной реакции респондентов и уровня рабочей нагрузки в предшествующие дни. Такие данные совпадают с результатами, полученными при оценке напряженности труда машинистов (Сериков, 2015) и пилотов (Зибарев и др., 2020), для которых количество непрерывных рабочих дней слабо коррелировало со скоростью сенсомоторных реакций при предрейсовом контроле и очень тесно на обследовании после смены, тогда как точность сенсомоторной реакции напрямую зависела от количества дней после отдыха вне зависимости от времени проведения обследования.

Накопленный опыт разработки предиктивных систем показал, что изменения только одного биомаркера имеют низкую точность для предсказания ошибок деятельности, для разработки предиктивных систем высокой точности необходима мультимодальная регистрация психофизиологических показателей. В нашем исследовании использовались показатели, отражающие активационные и когнитивные компоненты функциональных систем обеспечения деятельности. Если индексы ВСР чувствительны к уровню рабочей нагрузки, но не диагностичны в отношении ее причин, то показатели СМР отражают степень напряженности когнитивных процессов за счет увеличения длительности времени центральной задержки и прогрессивно возрастают по мере роста когнитивной нагрузки. Их совместное применение представляется продуктивным и перспективным.

Выводы

Одной из ключевых задач исследования являлся ответ на вопрос, определяется ли вероятность ошибочных действий в большей степени влиянием рабочей нагрузки или же функциональным состоянием

оператора, преломлением эффекта внешних факторов труда через индивидуальные особенности — толерантность к нагрузке, уровень подготовленности и тренированности, типологическое особенности нервной системы и пр.

Получены данные, что уровень активации нервной системы является наиболее значимым фактором, повышающим вероятность ошибки по типу пропуска сигнала. На вероятность ошибки по типу ошибочного действия как на задачу, требующую большей когнитивной переработки поступающей информации, оказывает сочетанное влияние и функциональное состояние, и величина рабочей нагрузки оператора.

Сенсорная нагрузка (количество сигналов, в том числе рабочих и аварийных сигналов, степень их зашумленности) является ключевым предиктором, опосредующим влияние остальных факторов рабочей нагрузки как на активационный компонент функционального состояния, так и на когнитивный его компонент. Установлено влияние уровня сенсорной нагрузки на функциональное состояние оператора. Низкий уровень сенсорной нагрузки позволяет поддерживать оптимальные показатели времени реакции и адаптации к трудовой деятельности до 5 рабочих дней, средний уровень — сокращает длительность периода оптимальной работоспособности, высокая сенсорная нагрузка вызывает избыточную активацию и рост психической напряженности уже в первый рабочий день.

Вероятность совершения ошибочной реакции более подвержена влиянию факторов рабочей нагрузки: достоверное повышение вероятности ошибки реагирования отмечается на 4-й день работы по непрерывному графику, влияние циркадных ритмов также начинает сказываться на вероятности ошибочных реакций на 3-й день, сенсорной нагрузки — с первого рабочего дня. Вероятность пропуска значимого сигнала достоверно повышается на 5-й день работы, с 4-го дня начинает повышаться вероятность пропуска сигнала в утреннюю и ночную смены, повышенная сенсорная нагрузка начинает влиять на вероятность пропуска только с 3-го рабочего дня. Вероятность пропуска менее чувствительна к факторам рабочей нагрузки, чем вероятность ошибочной реакции, что логично объясняется необходимостью центральной, когнитивной переработки поступающего сигнала при выборе ответного действия, тогда как пропуск сигнала связан с детекцией, детерминируется преднастройкой органов чувств и общим уровнем активации и более подвержен влиянию информационных перегрузок и развивающегося утомления.

Были выделены критические точки, связанные с развитием утомления и качественным ростом количества ошибок каждого типа. Их совместный анализ отражает динамику развития утомления операторов в зависимости от рабочего графика (времени суток и количества рабочих смен подряд). Статистически обоснована максимальная длительность надежного выполнения профессиональной деятельности в четыре рабочих дня.

Ограничения исследования

Одним из ограничений исследования является исключение из эмпирических результатов частоты встречаемости критических значений показателей сенсомоторной реакции и вариабельности сердечного ритма, поскольку данные значения являются недопустимо низким уровнем и отсеиваются при проведении контроля (например, время СМР свыше 700 мс). Отсутствие таких данных снижает точность прогнозирования вероятности ошибочных действий.

Вторым ограничением исследования являлось уменьшение количества данных для рабочих дней, превышающих три рабочих дня подряд: если в 1–3-й дни регистрировалось порядка 400 замеров, то в 4–5-й дни — около 150, начиная с 6-го дня — около 50 замеров. Соответственно, снижается достоверность полученных результатов под влиянием индивидуальных особенностей респондентов. К примеру, сенсорная нагрузка выступает основным фактором, влияющим на скорость сенсомоторной реакции на всех днях рабочего графика, однако для отдельных дней данные о сенсорной нагрузке отсутствуют.

Особенности профессиональной деятельности респондентов позволили осуществить лишь три замера (до начала смены, в середине, в конце), которые не позволяют построить всего по трем точкам классическую кривую работоспособности, требующую не менее 5 дискретных замеров и отражающую длительность и наклон стадии врабатывания, уровень плато оптимальной работоспособности и его продолжительность, наклон кривой утомления.

В исследовании не анализировалась важная в контексте темы исследования информация о возрасте и должности респондентов, поскольку эти данные были предоставлены не индивидуально (в целях нераскрытия информации о респондентах), а в обобщенном виде. По той же причине в исследовании не учитывались результаты ежегодного психофизиологического обследования, которые могли бы существенно обогатить исследование.

Направления дальнейших исследований

Нелинейный характер распределения данных точностных и скоростных показателей выполнения сенсомоторной пробы исключил построение простой линейной регрессионной модели для объяснения влияния переменных рабочей нагрузки и функционального состояния на результативные показатели. Представляется актуальной задача дальнейшего построения математической модели, описывающей совместное действие данных переменных на профессиональную надежность.

Одним из вариантов решения указанной проблемы может являться применение нейросетей как технологии, обеспечивающей интеграцию мультимодальных и нелинейных показателей и высокую точность детекции ошибок. Машинное обучение требует большого количества данных, нивелирующих влияние индивидуальных различий. Для реализации этой технологии требуется увеличение размера обследуемой выборки. Представленные в настоящем исследовании данные позволяют достоверно объяснить результаты для 1–5-го рабочего дня непрерывного графика, начиная с 6-го дня отмечалась высокая индивидуальная вариативность данных за счет небольшого количества респондентов, отработавших свыше 5 дней и имеющих полный комплекс измерений на этапе предсменного, сменного, послесменного контроля.

Отдельным направлением будущих исследований представляется определение и оценка командной надежности смены, в том числе оценка допустимого количества в смене работников с длительной предшествующей нагрузкой, при котором надежность смены остается на высоком уровне. При проведении такого исследования необходимо учитывать и другие факторы индивидуальной и групповой надежности, как то: объективные показатели успешности работы смены, опасные действия (в смене и в ходе ПАТ), учесть стаж работы в смене каждого работника, а также результаты ежегодного ПФО и социометрии.

В настоящем исследовании определен общий подход к исследованию проблемы, отработаны методы анализа данных. Исследование необходимо продолжить, расширив выборку, увеличив количество АЭС в эксперименте. Необходимо провести калибровку всех используемых АПК для снятия вопросов идентичности данных. Необходимо также расширить перечень предоставляемой информации (полные результаты исследования на АПК ЭСМО, результаты ПФО

респондентов, данные о возрасте, должности, стаже на АЭС, стаже в должности).

Отдельной линией будущих исследований является анализ влияния отработанных в лабораториях психофизиологического обеспечения атомных электростанций методов психологической и психофизиологической поддержки функциональной надежности работников.

Список литературы

Анохин, П.К. (1973). Принципиальные вопросы общей теории функциональных систем. Москва: Изд-во «Наука».

Бодров, В.А. (2009). Профессиональное утомление: Фундаментальные и прикладные проблемы. Москва: Изд-во Института психологии РАН.

Бодров, В.А., Орлов, В.Я. (1998). Психология и надежность: человек в системах управления техникой. Москва: Изд-во Института психологии РАН.

Захаров, А.В., Мороз, М.П., Перелыгин, В.В. (1988). Оценка работоспособности операторов с помощью статистических характеристик простой зрительно-моторной реакции. *Военно-медицинский журнал*, (1), 53–56.

Зибарев, Е.В., Бухтияров, И.В., Сериков, В.В., Калинина, С.А., Меркулова, А.Г. (2020). Оценка сенсорных нагрузок у пилотов воздушных судов гражданской авиации. *Медицина труда и промышленная экология*, (7), 435–442. https://doi.org/10.31089/1026-9428-2020-60-7-435-442

Капцов, В.А., Кузьмин, В.А. (2015). Состояние основных жизнеобеспечивающих систем машинистов в зависимости от условий и факторов поездной работы. *Гигиена и санитария*, (4), 36–39.

Козлов, В.В. (2024). Деятельность и надежность пилота в фокусе человеческого фактора. Москва: Изд-во «Академия Жуковского».

Комаров, Ю.Я. (2014). Повышение уровня безопасности на пассажирском автотранспорте с использованием комплексного подхода к профессиональному отбору водителей. *Автотранспортное предприятие*, (10), 18–22.

Леонова, А.Б., Медведев, В.И. (1981). Функциональные состояния человека в трудовой деятельности. Москва: Изд-во Московского ун-та.

Овчаров, Е.В. (2005). Человеческий фактор в авиационных происшествиях (методические материалы). Москва: Изд-во «Авикос».

Осипенко, А.В. (2015). Исследование динамики работоспособности и утомления операторов слежения по физиологическим характеристикам зрительного анализатора. *Евразийский Союз Ученых,* (13), 151–152.

Сериков, В.В. (2015). Изучение структуры надежности профессиональной деятельности работников локомотивных бригад. *Железнодорожная медицина и профессиональная биоритмология,* (26), 31–44.

Шутова, С.В., Муравьева, И.В. (2013). Сенсомоторные реакции как характеристика функционального состояния ЦНС. *Вестник ТГУ. Математика и механика, 18*(5), 2831–2838.

Abu-Alqumsan, M., Kapeller, C., Hintermüller, C., Guger, C., Peer, A. (2017). Invariance and variability in interaction error-related potentials and their consequences for classification. *Journal of Neural Engineering, 14*(6), 066015. https://doi.org/10.1088/1741-2552/aa8416

Bobko, N.A., Karpenko, O.V., Cherniuk, V.I. (1998). The combined effect of work stress, fatigue and circadian rhythms on the efficiency of mental activity in operators. *Fiziolohichnyi zhurnal, 44*(5-6), 35–42.

Gao, Q., Wang, Y., Song, F., Li, Z., Dong, X. (2013). Mental workload measurement for emergency operating procedures in digital nuclear power plants. *Ergonomics, 56*(7), 1070–1085. https://doi.org/10.1080/00140139.2013.790483

Giese, S., Carr, D., Chahl, J. (2013). Implications for Unmanned Systems Research of Military UAV Mishap Statistics. In: 2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), (June, 23–26, 2013). Gold Coast: IEEE Publ. https://doi.org/10.1109/IVS.2013.6629628

Halomoan, J., Ramli, K., Sudiana, D., Gunawan, T.S., Salman, M. (2023). A New ECG Data Processing Approach to Developing an Accurate Driving Fatigue Detection Framework with Heart Rate Variability Analysis and Ensemble Learning. *Information, 14*(4), 210. https://doi.org/10.3390/info14040210

Havenith, G. (2004). Handbook of Human Factors and Ergonomics Methods. Boca Raton, London, New York, Washington, CRC Press.

Kim, J.H., Suh, Y.-A., Yim, M.-S. (2018). An Investigation of Human Error Identification Based on Bio-monitoring System (EEG and ECG Analysis). In: H. Ayaz, L. Mazur, (eds.). Advances in Neuroergonomics and Cognitive Engineering. AHFE 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing. (pp. 145–151). Cham: Springer Publ.

Kosch, T., Matviienko, A., Müller, F., Bersch, J., Katins, C., Schön, D., Mühlhäuser, M. (2022). NotiBike: Assessing Target Selection Techniques for Cyclist Notifications in Augmented Reality. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction, 6*, 1–24. https://doi.org/10.1145/3546732

Liu, J., Aydin, M., Akyuz, E., Arslan, O., Uflaz, E., Kurt, R.E., Turan, O. (2021). Prediction of human–machine interface (HMI) operational errors for maritime autonomous surface ships (MASS). *Journal of Marine Science and Technology, 27*, 293–306. https://doi.org/10.1007/s00773-021-00834-w

Lynch, K.M., Banks, V.A., Roberts, A.P., Radcliffe, S., Plant, K.L. (2022). Maritime Autonomous Surface Ships: Can we learn from Unmanned Aerial Vehicle incidents using the Perceptual Cycle Model? *Ergonomics, 66*(4), 772–790. https://doi.org/10.1080/00140139.2022.2126896

Wang, P., Houghton, R., Majumdar, A. (2024). Detecting and Predicting Pilot Mental Workload Using Heart Rate Variability: A Systematic Review. *Sensors, 24*(12). https://doi.org/10.3390/s24123723

Weyers, B., Burkolter, D., Kluge, A., Luther, W. (2010). User-Centered Interface Reconfiguration for Error Reduction in Human-Computer Interaction. In: Third International Conference on Advances in Human-Oriented and Personalized Mechanisms, Technologies and Services. (pp. 52–55). Gold Coast: IEEE Publ. https://doi.org/10.1109/CENTRIC.2010.11

Wilson, G.F, Russell, C.A. (2003). Operator functional state classification using multiple psychophysiological features in an air traffic control task. *The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 45*(3). https://doi.org/10.1518/hfes.45.3.381.27252

References

Abu-Alqumsan, M., Kapeller, C., Hintermüller, C., Guger, C., Peer, A. (2017). Invariance and variability in interaction error-related potentials and their consequences for classification. *Journal of Neural Engineering, 14*(6), 066015. https://doi.org/10.1088/1741-2552/aa8416

Anokhin, P.K. (1973). Fundamental issues of the general theory of functional systems. Moscow: Nauka Publ. (In Russ.)

Bobko, N.A., Karpenko, O.V., Cherniuk, V.I. (1998). The combined effect of work stress, fatigue and circadian rhythms on the efficiency of mental activity in operators. *Fiziolohichnyi zhurnal, 44*(5-6), 35–42.

Bodrov, V.A. (2009). Professional fatigue: Fundamental and applied problems. Moscow: Institute of Psychology Russian Academy of Sciences Press. (In Russ.)

Bodrov, V.A., Orlov, V.Ya. (1998). Psychology and reliability: man in technology control systems. Moscow: Institute of Psychology Russian Academy of Sciences Press. (In Russ.)

Gao, Q., Wang, Y., Song, F., Li, Z., Dong, X. (2013). Mental workload measurement for emergency operating procedures in digital nuclear power plants. *Ergonomics, 56*(7), 1070–1085. https://doi.org/10.1080/00140139.2013.790483

Giese, S., Carr, D., Chahl, J. (2013). Implications for Unmanned Systems Research of Military UAV Mishap Statistics. In: 2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), (June, 23–26, 2013). Gold Coast: IEEE Publ. https://doi.org/10.1109/IVS.2013.6629628

Halomoan, J., Ramli, K., Sudiana, D., Gunawan, T.S., Salman, M. (2023). A New ECG Data Processing Approach to Developing an Accurate Driving Fatigue Detection Framework with Heart Rate Variability Analysis and Ensemble Learning. *Information, 14*(4), 210. https://doi.org/10.3390/info14040210

Havenith, G. (2004). Handbook of Human Factors and Ergonomics Methods. Boca Raton, London, New York, Washington, CRC Press.

Kaptsov, V.A., Kuzmin, V.A. (2015). The state of the main life-support systems of drivers depending on the conditions and factors of train work. *Gigiena i sanitariya = Hygiene and Sanitation*, (4), 36–39. (In Russ.)

Kim, J.H., Suh, Y.-A., Yim, M.-S. (2018). An Investigation of Human Error Identification Based on Bio-monitoring System (EEG and ECG Analysis). In: H. Ayaz, L. Mazur, (eds.). Advances in Neuroergonomics and Cognitive Engineering. AHFE 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing. (pp. 145–151). Cham: Springer Publ.

Komarov, Yu.Ya. (2014). Improving the level of safety in passenger motor transport using an integrated approach to the professional selection of drivers. *Avtotransportnoe predpriyatie = Motor Transport Enterprise*, (10), 18–22. (In Russ.)

Kosch, T., Matviienko, A., Müller, F., Bersch, J., Katins, C., Schön, D., Mühlhäuser, M. (2022). NotiBike: Assessing Target Selection Techniques for Cyclist Notifications in Augmented Reality. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction, 6*, 1–24. https://doi.org/10.1145/3546732

Kozlov, V.V. (2024). Pilot activity and reliability in focus of the human factor. Moscow: Academia Zhukovskogo Publ. (In Russ.)

Leonova, A.B., Medvedev, V.I. (1981). Functional states of a person in work activity. Moscow: Moscow Univ. Press. (In Russ.)

Liu, J., Aydin, M., Akyuz, E., Arslan, O., Uflaz, E., Kurt, R.E., Turan, O. (2021). Prediction of human–machine interface (HMI) operational errors for maritime autonomous surface ships (MASS). *Journal of Marine Science and Technology, 27*, 293–306. https://doi.org/10.1007/s00773-021-00834-w

Lynch, K.M., Banks, V.A., Roberts, A.P., Radcliffe, S., Plant, K.L. (2022). Maritime Autonomous Surface Ships: Can we learn from Unmanned Aerial Vehicle incidents using the Perceptual Cycle Model? *Ergonomics, 66*(4), 772–790. https://doi.org/10.1080/00140139.2022.2126896

Osipenko, A.V. (2015). Study of the dynamics of performance and fatigue of tracking operators based on the physiological characteristics of the visual analyzer. *Eurasian Union of Scientists, 4*(13), 151–152. (In Russ.)

Ovcharov, E.V. (2005). Human factor in aviation accidents (methodological materials). Moscow: Avikos Publ. (In Russ.)

Serikov, V.V. (2015). A study of the professional reliability structure of locomotive crew members. *Zheleznodorozhnaya medicina i professional'naya bioritmologiya = Railway Medicine and Occupational Biorhythmology,* (26), 31–44. (In Russ.)

Shutova, S.V., Muravyova, I.V. (2013). Sensorimotor reactions as a characteristic of the functional state of the central nervous system. *Vestnik TGU. Matematika i mekhanika = Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics, 18*(5), 2831–2838. (In Russ.)

Wang, P., Houghton, R., Majumdar, A. (2024). Detecting and Predicting Pilot Mental Workload Using Heart Rate Variability: A Systematic Review. *Sensors, 24*(12). https://doi.org/10.3390/s24123723

Weyers, B., Burkolter, D., Kluge, A., Luther, W. (2010). User-Centered Interface Reconfiguration for Error Reduction in Human-Computer Interaction. In: Third International Conference on Advances in Human-Oriented and Personalized Mechanisms, Technologies and Services. (pp. 52–55). Gold Coast: IEEE Publ. https://doi.org/10.1109/CENTRIC.2010.11

Wilson, G.F, Russell, C.A. (2003). Operator functional state classification using multiple psychophysiological features in an air traffic control task. *The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 45*(3). https://doi.org/10.1518/hfes.45.3.381.27252

Zakharov, A.V., Moroz, M.P., Perelygin, V.V. (1988). Evaluation of operator performance using statistical characteristics of a simple visual-motor reaction. *Voenno-medicinskij zhurnal = Military Medical Journal*, (1), 53–56. (In Russ.)

Zibarev, E.V., Bukhtiyarov, I.V., Serikov, V.V., Kalinina, S.A., Merkulova, A.G. (2020). Assessment of sensory loads in civil aviation pilots. *Medicina truda i promyshlennaya ekologiya = Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*, (7), 435–442. (In Russ.). https://doi.org/10.31089/1026-9428-2020-60-7-435-442

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Елена Дмитриевна Чернецкая, кандидат психологических наук, директор Центра компетенций по культуре безопасности и надежности человеческого фактора Технической академии Росатома, Обнинск, Российская Федерация, ElDChernetskaya@rosatom.ru, https://orcid.org/0000-0002-6014-6891

Елена Васильевна Леонова, доктор психологических наук, главный эксперт Центра компетенций по культуре безопасности и надежности человеческого фактора Технической академии Росатома, Обнинск, Российская Федерация, e.v.leonova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3171-2943

Юлия Владимировна Бессонова, кандидат психологических наук, ведущий эксперт Центра компетенций по культуре безопасности и надежности человеческого фактора Технической академии Росатома, Обнинск; старший научный сотрудник Института психологии Российской академии наук, Москва, Российская Федерация, eolliene@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8003-3790

Лариса Олеговна Андрюшина, кандидат психологических наук, руководитель проекта департамента подготовки персонала АО «Концерн Росэнергоатом», Москва, Российская Федерация, andryushina-lo@rosenergoatom.ru, https://orcid.org/0009-0007-7128-1814

ABOUT THE AUTHORS

Elena D. Chernetskaya, Cand. Sci. (Psychol.), Director of the Centre for Safety Culture and Human Factors Reliability, Rosatom Technical Academy, Obninsk, Russian Federation ElDChernetskaya@rosatom.ru, https://orcid.org/0000-0002-6014-6891

Elena V. Leonova, Dr. Sci. (Psychol.), Chief Expert of the Centre for Safety Culture and Human Factors Reliability, Rosatom Technical Academy, Obninsk, Russian Federation, e.v.leonova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3171-2943

Yulia V. Bessonova, Cand. Sci. (Psychol.), Leading expert of the Centre for Safety Culture and Human Factors Reliability, Rosatom Technical Academy, Obninsk; Senior Researcher, Psychology Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation eolliene@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8003-3790

Larisa O. Andryushina, Cand. Sci. (Psychol.), Project Manager of Personnel Training Department of Rosenergoatom JSC, Moscow, Russian Federation, andryushina-lo@rosenergoatom.ru, https://orcid.org/0009-0007-7128-1814

Поступила 10.09.2025. Получена после доработки 10.11.2025. Принята в печать 04.12.2025.

Received 10.09.2025. Revised 10.11.2025. Accepted 04.12.2025.