

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТОВ СЛОЖНОЙ СЕНСОМОТОРНОЙ РЕАКЦИИ У РАБОТНИКОВ ОБЪЕКТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

О.А.Тихонова¹, А.Н.Царев¹, И.Г.Дибиргаджиев¹, Т.Д.Симагова¹, О.В.Паринов¹,
О.А.Касымова¹, Р.М.Степанов²

¹ ФГБУ «ГНЦ – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И.Бурназяна» ФМБА России,
Москва, Россия

² НПО «Объединенные медицинские системы», г.Набережные Челны, Россия

Резюме. Цели исследования – определить по интегральному показателю, рассчитываемому на основе спектрального анализа результатов сложной сенсомоторной реакции (ССМР), уровень психофизиологического состояния у работников объектов использования атомной энергии; сравнить этот показатель с нормативными показателями, содержащимися в действующих «Методических указаниях по проведению медицинских осмотров и психофизиологических обследований работников объектов использования атомной энергии» 1999 г. (МУ-1999); определить границы его нормальных колебаний, определяемые как два среднеквадратичных отклонения (SD) от среднего, и недопустимые величины этого показателя. **Материалы и методы исследования.** Материалы исследования – результаты психофизиологического обследования (ПФО), проведенного в лабораториях психофизиологических исследований в медицинских организациях Федерального медико-биологического агентства (ФМБА России) – 20 организаций и Минздрава России – 12 организаций в соответствии с приказом Минздрава России от 28.07.2020 г. №749н. Всего в анализ были включены результаты 6085 обследований, выполненных с 19.01.2021 по 07.03.2024 г. Распределение обследованных по полу: мужчин – 5423, средний возраст (44,5±0,9) года; женщин – 662, средний возраст (41,3±0,8) года. Методы исследования – к результатам ССМР применили метод быстрого преобразования Фурье (БПФ), реализованный в виде собственного алгоритма авторов в среде MS Excel с расчётом показателя «Частотная плотность мощности сигнала» ($P\omega$), нормированного к количеству стимулов ССМР в виде десятичного логарифма $Lg(P\omega_{norm})$.

Результаты исследования и их анализ. Получены результаты оценки ССМР по нормативным показателям «Среднее время реакции» (МСР) и «Среднеквадратичное отклонение» (SD) из МУ-1999, которые были сопоставлены с $Lg(P\omega_{norm})$. Выявлена более сильная корреляция показателя $Lg(P\omega_{norm})$ как с МСР, так и с SD, чем этих показателей между собой. Установлены статистически значимые различия данного показателя при изменении ССМР; определены верхняя и нижняя границы нормы, равные от 3,63 до 4,83 логарифмических единиц, и их недопустимые значения.

Заключение. В исследовании приведено обоснование актуальности исследований в области разработки и совершенствования показателей оценки функционального состояния центральной нервной системы (ЦНС) обследуемых лиц на основе использования математического аппарата БПФ. По данным 6085 обследований предложен новый интегральный показатель $Lg(P\omega_{norm})$, приведена методика его расчета и определены его нормативные значения.

Ключевые слова: вариационная сенсометрия, прямое дискретное преобразование Фурье, психофизиологическое обследование, работники объектов использования атомной энергии, сложная сенсомоторная реакция, спектральный анализ, частотная плотность мощности сигнала

Конфликт интересов. Авторы статьи подтверждают отсутствие конфликта интересов

Для цитирования: Тихонова О.А., Царев А.Н., Дибиргаджиев И.Г., Симагова Т.Д., Паринов О.В., Касымова О.А., Степанов Р.М. Применение спектрального анализа для оценки результатов сложной сенсомоторной реакции у работников объектов использования атомной энергии // Медицина катастроф. 2025. №2. С. 76-81. <https://doi.org/10.33266/2070-1004-2025-2-76-81>

APPLICATION OF THE SPECTRAL ANALYSIS TO ASSESS THE COMPLEX SENSORYMOTOR REACTION OF WORKERS AT NUCLEAR ENERGY FACILITIES

О.А.Тихонова¹, А.Н.Царев¹, И.Г.Дибиргаджиев¹, Т.Д.Симагова¹, О.В.Паринов¹, О.А.Касымова¹, Р.М.Степанов²

¹ State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russian Federation

² NPO "United Medical Systems" LLC, Naberezhnye Chelny, Russian Federation

Summary. The purposes of the study are to determine the level of psychophysiological state of workers at nuclear facilities using an integral indicator calculated based on the spectral analysis of the results of the complex sensorimotor reaction (CSMR). To compare this indicator with the standard indicators contained in the current "Methodological Guidelines for Conducting Medical Examinations and Psychophysiological Surveys of Workers at Nuclear Facilities" of 1999 (MU-1999). To determine the boundaries of its normal fluctuations, defined as two standard deviations (SD) from the mean, and unacceptable values of this indicator.

Research materials and methods. Research materials - the results of the psychophysiological examination conducted in the laboratories of psychophysiological research in medical organizations of the Federal Medical and Biological Agency (FMBA of Russia) –

20 organizations and the Ministry of Health of Russia – 12 organizations in accordance with the order of the Ministry of Health dated July 28, 2020 No. 749n. In total, the analysis included the results of 6,085 examinations performed from 19.01.2021 to 07.03.2024. Distribution of the examined by gender: men – 5,423, average age (44.5 ± 0.9) years; women – 662, average age (41.3 ± 0.8) years. Research methods – the fast Fourier transform (FFT) method was applied to the SSMR results, implemented in the form of the authors' own algorithm in the MS Excel environment with the calculation of the "Frequency density of signal power" ($P\omega$) indicator, normalized to the number of SSMR stimuli in the form of the decimal logarithm $\text{Lg}(P\omega_{\text{norm}})$.

Research results and their analysis. The results of the assessment of the SRMT using the standard indicators "Mean reaction time" (MRT) and "Root mean square deviation" from MU-1999 were obtained and compared with $\text{Lg}(P\omega_{\text{norm}})$. A stronger correlation of the $\text{Lg}(P\omega_{\text{norm}})$ indicator with both MRT and SD was revealed than between these indicators. Statistically significant differences in this indicator with changes in the SRMT were established; its upper and lower limits of the norm, equal to 3.63 to 4.83 logarithmic units, and their unacceptable values were determined.

Conclusion. The study provides a rationale for the relevance of research in the field of development and improvement of indicators for assessing the functional state of the central nervous system of subjects using the mathematical apparatus of the FFT. Based on the data of 6085 examinations, a new integral indicator $\text{Lg}(P\omega_{\text{norm}})$ was proposed, a method for its calculation was given, and its standard values were determined.

Key words: complex sensorimotor reaction, direct discrete Fourier transform, frequency density of signal power, psychophysiological examination, spectral analysis, variational sensometrics, workers at nuclear power facilities

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest

For citation: Tikhonova O.A., Tsarev A.N., Dibirgadzhiev I.G., Simagova T.D., Parinov O.V., Kasymova O.A., Stepanov R.M. Application of the Spectral Analysis to Assess the Complex Sensorymotor Reaction of Workers at Nuclear Energy Facilities. *Medititsina Katastrof* = Disaster Medicine. 2025;2:76-81 (In Russ.). <https://doi.org/10.33266/2070-1004-2025-2-76-81>

Контактная информация:

Царев Алексей Николаевич – канд. мед. наук, старший научный сотрудник ФГБУ «ГНЦ – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна» ФМБА России

Адрес: Россия, 123098, Москва, ул. Живописная, д. 46
Тел.: +7 (903) 873-07-45

E-mail: tsarev58@yandex.ru

Contact information:

Aleksey N. Tsarev – Cand. Sc. (Med.), Senior Researcher of State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency

Address: 46, Zhivopisnaya Str., Moscow, 123098, Russia
Phone: +7 (903) 873-07-45

E-mail: tsarev58@yandex.ru

Введение

У обслуживающего персонала объектов использования атомной энергии под влиянием автоматизации производственных процессов и средств управления постоянно возрастает информационная нагрузка на центральную нервную систему (ЦНС). Повышаются требования к способности восприятия информации и её переработки в ЦНС, которая зависит, прежде всего, от психофизиологических (когнитивных) способностей человека. Поэтому при отборе персонала, оценке динамики изменения функционального состояния (ФС) ЦНС и её своевременной коррекции у работников объектов использования атомной энергии, прежде всего – на опасных производственных объектах – появляется необходимость использовать психофизиологические методы [1].

История возникновения и развития психофизиологического обследования (ПФО) связана с немецким философом Христианом фон Вольфом, который в 1732 г. в книге «Рациональная психология» впервые применил термин «психофизиология». Становление психофизиологии в России в XIX в. началось в рамках медицины. Дальнейшее развитие психофизиологии было связано с потребностями авиации, в которой был организован психофизиологический отбор авиаторов. При кафедре нервных и душевных болезней Медико-хирургической академии организовали психологическую лабораторию и с 1913 г. начали изучение психологических и психофизиологических качеств российских пилотов. Первая психофизиологическая лаборатория была организована С.Е.Минц в 1921 г. при Московской школе авиации.

После аварии на Чернобыльской АЭС 26 апреля 1986 г. в атомной энергетике также начали практиковать психофизиологический отбор персонала. Приказом Минатомэнерго СССР от 31 декабря 1987 г. №226з было

введено обязательное психофизиологическое обследование персонала атомных электростанций. Кроме того, в 1988 г. были введены в действие «Временные методические указания по организации и проведению профессионального психофизиологического отбора персонала атомных станций». В настоящее время сенсомоторные реакции оценивают в соответствии с «Методическими указаниями по проведению медицинских осмотров и психофизиологических обследований работников объектов использования атомной энергии», введёнными в действие в 1999 г. (далее – МУ-1999) – [2]. В МУ-1999 приведены нормативы для сложной сенсомоторной реакции (ССМР) – табл. 1.

В медицине и биологии пределами допустимых колебаний популяционной статистической нормы показателей приняты границы интервала двух среднеквадратичных отклонений (SD), т.е. $(MCP \pm 2SD)$. При этом за пределами статистической нормы находятся 5% выборки исследуемого показателя. Выход за пределы популяционной статистической нормы позволяет выявить группу риска нарушений здоровья и с высокой вероятностью указать на неблагоприятный прогноз профессиональной адаптации, работоспособности и надежности человека. Вероятность неблагоприятного прогноза возрастает по мере увеличения отклонений значений показателей от популяционных границ статистической нормы.

По нормативам МУ-1999, недопустимые величины среднего времени реакции превышают порог статистической нормы показателя $(MCP \pm 2SD)$ на величину $3,25SD$. Таким образом, заключение об отсутствии психофизиологических противопоказаний не укладывается в общепринятую в медицине и биологии статистическую норму и поэтому не соответствует реальному состоянию здоровья и профессиональной работоспособности

Таблица 1 / Table No. 1

**Нормативы психодиагностических и психофизиологических методик и недопустимые величины
прогностически значимых показателей**

Standards of psychodiagnostic and psychophysiological techniques and unacceptable values of prognostically significant indices

Показатель сложной сенсомоторной реакции / Complex sensorimotor reaction index	Среднее значение / Average value M_{CP}	Верхняя граница нормы / Upper limit of normal $M_{CP}+2SD$	Нижняя граница нормы / Lower limit of normal $M_{CP}-2SD$	Недопустимые величины прогностически значимых показателей / Inadmissible values of prognostically significant indicators
Среднее время реакции $-M_{CP}$, мс / Mean reaction time $-MSR$, ms	407,0	582,3	231,8	$T>700$
Среднеквадратичное отклонение $-SD$ / Standard deviation $-SD$	90,1	150,2	29,9	-
Пропуск, количество / Omissions, number	0,0	0,6	0,0	$T>2$
Ошибкачная реакция, количество / Error reaction, number	1,4	3,6	0,0	$T>4$

обследуемых. Кроме того, в нормативах МУ-1999 четыре показателя оценки ССМР оценивают по отдельности, не учитывая их взаимосвязи.

Скорость сенсомоторных реакций напрямую отражает динамику и сбалансированность процессов возбуждения и торможения в ЦНС, т.е. её функциональное состояние [3–6]. Волнение, перенапряжение, утомление и другие психоэмоциональные факторы непосредственно сказываются на скорости (быстроте) и вариативности сенсомоторной реакции. Поэтому мы считаем основным показателем, характеризующим ФС ЦНС, величину и стабильность скорости реакции.

В сложной сенсомоторной методике, описанной в МУ-1999, приведены два показателя внимания: «пропуск реакций» и «ошибкачная реакция на стимул», которые отражают его способность к концентрации и переключению [7]. Поэтому мы считаем, что эти два показателя необходимо «суммировать», т.е. свести к одному новому показателю.

Показатели «Средняя скорость реакции» и «Среднеквадратичное отклонение скоростей реакций» ССМР мы также предлагаем оценивать одновременно с помощью десятичного логарифма нормализованного показателя «Частотная плотность мощности сигнала» – $Lg(P\omega_{norm})$. К массиву данных из скоростей ССМР применяют метод быстрого преобразования Фурье (БПФ) и получают «на выходе» пул гармоник прямого дискретного преобразования Фурье [8–10]. На основе этих гармоник рассчитывается показатель $Lg(P\omega_{norm})$, отражающий состояние ЦНС обследуемого в момент прохождения тестов.

Метод преобразования Фурье известен и широко применяется во множестве предметных областей для быстрого и точного анализа огромных объемов любых числовых данных. В медицине его применяют для спектрального анализа ритма сердца, позволяющего глубже понять взаимодействие различных систем и разработать индивидуальные подходы к лечению и профилактике заболеваний [11, 12]. Также спектральный анализ широко применяют для обработки и интерпретации данных электроэнцефалограммы. Он позволяет определить частотные компоненты электрической активности мозга и их мощность, что дает представление о функционировании различных областей мозга. Кроме того, спектральный анализ является важным инструментом в клинической практике и научных исследованиях, помогая в разработке новых методов диагностики, лечения и профилактики заболеваний [13–15].

Мы рассматриваем показатель $Lg(P\omega_{norm})$ как интегральный, т.е. позволяющий оценить ФС ЦНС одним параметром, что упрощает и ускоряет процедуру его оценки на основе данных тестирования.

Цели исследования – определить по интегральному показателю, рассчитываемому на основе спектрального анализа результатов сложной сенсомоторной реакции, уровень психофизиологического состояния у работников объектов использования атомной энергии; сравнить этот показатель с нормативными показателями, содержащимися в действующих «Методических указаниях по проведению медицинских осмотров и психофизиологических обследований работников объектов использования атомной энергии» 1999 г. (МУ-1999); определить границы его нормальных колебаний, определяемые как два среднеквадратичных отклонения (SD) от среднего, и недопустимые величины этого показателя.

Материалы и методы исследования. Авторы проанализировали результаты ПФО, выполненных в соответствии с приказом Минздрава России от 28 июля 2020 г. №749н¹ в лабораториях психофизиологических исследований 20 лечебных медицинских организаций (ЛМО) ФМБА России и 12 ЛМО Минздрава России.

Всего в анализ были включены результаты 6085 обследований, проведенных с 19 января 2021 по 7 марта 2024 г. Контингент обследованных: мужчин – 5423, средний возраст – (44,5±0,9) года, женщин – 662, средний возраст – (41,3±0,8) года.

В качестве исходных использовали числовые данные измеренных скоростей реакции на предъявляемые стимулы при прохождении теста сложной зрительно-моторной реакции (СЗМР); в соответствии с МУ-1999 – это 16 значимых стимулов. Данные тестирования анализировали с помощью метода «Анализ Фурье» на вкладке «Данные» в программе MS Excel 2010 (Microsoft, США), выдающего спектр частот (пул комплексных чисел, соответствующих гармоникам), на основе характеристик которого рассчитывали показатель $Lg(P\omega_{norm})$ – рис. 1.

Исходные данные представляют собой эмпирически заданную функцию или сигнал $f(t)$. Применение к этим данным метода БПФ, реализованного в программе MS Excel, позволяет получить на выходе пул комплексных чисел $\{Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_{16}\}$, представляющих собой гармоники БПФ. Этот спектр гармоник аппроксимирует

¹ Об утверждении требований к проведению медицинских осмотров и психофизиологических обследований работников объектов использования атомной энергии, порядка их проведения, перечня медицинских противопоказаний для выдачи разрешения на выполнение определенных видов деятельности в области использования атомной энергии и перечня должностей работников объектов использования атомной энергии, на которые распространяются данные противопоказания, а также формы медицинского заключения о наличии (отсутствии) медицинских противопоказаний для выдачи разрешения на выполнение определенных видов деятельности в области использования атомной энергии: приказ Минздрава России от 28 июля 2020 г. №749н

	B	C	D	E	F
1	477	841	770	727	587
2	522	725	513	625	542
3	320	642	501	575	540
4	440	716	390	638	678
5	249	625	355	605	537
6	262	605	518	714	531
7	448	641	510	640	535
8	571	617	488	609	612
9	463	673	411	669	529
10	440	867	565	632	521
11	573	691	447	622	475
12	479	585	455	684	566
13	365	566	542	706	518
14	314	714	416	660	508
15	619	620	503	778	463
16	459	580	424	752	553
17					
18	7001	10768	7808	10636	8735
	-	22,011106823137-	221,155859739488+105,090	209,725990273001+281,82	88,9568370772092-
	66,7242574118897+425,64	74,7773713943674i	742456322i	6233114185i	286,519377795391i
19	5726802796i				
	677,432070249714-	400,074639149333-	433,199530830361+10,5527	29,8456710674487+331,30	50,3933982822013-
	20,4543648263006i	296,1528496361368	778486358i	8657865101i	118,116269709676i
20					
	46,4918191636971-	17,3011755623247+207,18638	435,662585059267-	138,086162964805+171,45	-18,5101640604667-
	30,2435464293164i	227,060781045006i	227,060781045006i	8151855125i	137,076909554624i
21					
	-406+411i	111-473i	117-255i	91,99999999999997+51,999	158+267i
22				999999999997i	
	95,4730929508964-	452,296124928441+49,588402	215,869377509198+233,206		144,40965899708+18,670348
	397,8700968755098	4943994i	246259752i		150,779617140757+111,82
23				8642816103i	4904899i
	-25,4320702497142-	245,9253608506496-	134,800469169638-	140,15432893255-	71,603601717798-
	368,454364826301i	152,1528496361354	119,447222151364i	110,691342134899i	84,1162697096762i
24					

Рис. 1. Пример числовых массивов данных в программе MS Excel, полученных после использования алгоритма БПФ

Примечание: массив исходных данных из времени реакции обследуемых в программе MS Excel (строки 1–16), к которым применен метод БПФ; в результате его применения к данным был получен пул комплексных чисел (строки 18–24); метод БПФ – метод быстрого преобразования Фурье

Fig. 1. An example of numerical arrays of data in MS Excel obtained after using the FFT algorithm

(описывает) нашу эмпирическую функцию $f(t)$ и позволяет получить спектральные характеристики этого сигнала (формула 1):

$$f(t) \approx A_0 + \sum_{n=1}^N A_n \sin(n\omega_0 t + \varphi_n) \quad (1)$$

где: $f(t)$ – функция, представленная данными измеренных времён реакций обследуемого на зрительные стимулы при прохождении теста СЗМР;

A_0 – амплитуда нулевой гармоники – постоянная составляющая;

N – общее количество ненулевых гармоник;

A_n – амплитуда n -й гармоники;

Ω_1 – основная частота гармоник ($\omega_1 = 2\pi/T$);

T – период функции $f(t)$ – равен общему количеству числовых данных, которыми представлена эмпирическая функция (так как функция $f(t)$ представляет собой ряд данных из измеренных времён реакций, то интервал между этими данными на временной шкале принимается равным единице, соответственно период такой функции станет равен общему количеству данных);

$\omega_n = n^2 \omega_1$ – частота n -й гармоники (кратные частоты гармоник);

φ_n – фаза n -й гармоники.

Амплитуды (A_n) и фазы (φ_n) каждой гармоники (Z_i) вычисляются в программе MS Excel функциями МНИМ.АБС(Z_i) и МНИМ.АРГУМЕНТ(Z_i). Полученные множества $\{A_n\}$ и $\{\varphi_n\}$ образуют дискретный амплитудный и фазовый спектры сигнала $f(t)$. На основе множеств $\{A_n\}$, $\{\varphi_n\}$, $\{\omega_n\}$ вычисляются спектральные характеристики сигнала $f(t)$. В частности, вычисляется показатель «Частотная плотность мощности сигнала».

Квадрат амплитуды $|A_i|^2$ гармоники Z_i образует мощность i -й гармоники. Средняя мощность сигнала $f(t)$ определяется как сумма мощностей всех гармонических составляющих спектра этого сигнала P_f согласно теореме Парсеваля (формула 2):

$$\langle P_f \rangle = \sum_{n=1}^N |A_n|^2 \quad (2)$$

Отношения средней мощности сигнала на всю ширину частотного диапазона спектра ($\omega_{\max} - \omega_{\min}$) сигнала $f(t)$ позволяет получить среднюю мощность сигнала $f(t)$, приходящуюся на каждую частоту в спектре этого сигнала, т.е. среднюю частотную плотность мощности сигнала $f(t)$ или, упрощенно, частотную плотность мощности сигнала – показатель P_{ω} (формула 3).

$$P_{\omega} = \frac{\sum_{n=1}^N |A_n|^2}{(\omega_{\max} - \omega_{\min})} \quad (3)$$

где: P_{ω} – частотная плотность мощности сигнала $f(t)$;

N – общее количество ненулевых гармоник в спектре;

ω_{\max} – максимальная частота ненулевой гармоники в спектре;

ω_{\min} – минимальная частота ненулевой гармоники в спектре.

Таким образом, показатель «Частотная плотность мощности сигнала» вычисляется на основе эмпирически полученного массива времён реакций у обследуемых при выполнении СЗМР путем применения к ним алгоритма БПФ, с последующим вычислением отношения средней мощности сигнала на всю ширину частотного спектра этого сигнала. На практике мы рекомендуем использовать преобразованный вариант P_{ω} , а именно – нормированный к количеству предъявляемых стимулов (4) и логарифмированный показатель $\text{Lg}(P_{\omega_{\text{norm}}})$ – формула 4.

$$P_{\omega_{\text{norm}}} = \frac{P_{\omega}}{(N-1)} \quad (4)$$

Такая версия показателя $\text{Lg}(P_{\omega_{\text{norm}}})$ более удобна в использовании из-за ее небольшого значения по модулю и нормировке на количество предъявляемых стимулов N – при применении БПФ к данным получим такое же количество гармоник = N .

В среде MS Excel мы реализовали алгоритм (модель) расчета показателя «Частотная плотность мощности сигнала» (рис. 2). На вход модели подают пул комплексных

ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ

N = 32 **ОБЩЕЕ ЧИСЛО ИЗМЕРЕНИЙ**
 Число N (количество строк в таблице) должно быть кратно 2^n (2,4,8,16,32,...)

ω1 = 0,1963 **ОСНОВНАЯ ЧАСТОТА**
 Считается по правилу: Если N не пусто и не равно 0 то 2^n И/Н

ДАННЫЕ НА ВХОДЕ	n (счетчик гармоник n = 0, 1, 2, ...)	Амплитуда гармоники M(N,ABS)	Фаза гармоники ГРАД(СЫ(МНК МАРГУМЕНТ))	Частоты гармоник	Средняя мощность сигнала	Частотная плотность мощности сигнала	Нормирование	РЕЗУЛЬТАТ НА ВЫХОДЕ
РЕЗУЛЬТАТ БПФ		A_n	$Φ_n$	$ω_n = n * ω_1$	$< P_f > = \sum_{n=1}^N A_n ^2$	$P_o = \frac{\sum_{n=1}^N A_n ^2}{(ω_{max} - ω_{min})}$	$P_{norm} = \frac{P_o}{(N-1)}$	Логарифмирование
7202	0	7202,00	0	0	273532	204,92917	9,19126	0,963375214
109,0670957679088+42,9318153621646i	1	117,21	21,4599664	32	13738,77215			
21,7300439378376-9,58362432954418i	2	23,75	-23,79996917	64	564,046648			
66,7011463820215-94,4529658453061i	3	115,63	-54,77008417	96	13370,40569			
98,0035713374679-106,660425586961i	4	144,85	-47,42204656	128	20981,14638			
20,5275341218192-81,7373121978258i	5	84,28	-75,90228012	160	7102,367862			
33,682634497273-6,5731050627798i	6	34,32	-11,04238825	192	1177,725577			
25,2813345699985+57,7539367535735i	7	63,04	66,35997634	224	3974,663068			
-29,0000000000002+12,9999999999999i	8	37,01	141,5819447	256	1370			
-45,9703662887741+1,09097161769581i	9	45,98	178,6405082	288	2114,46490			
11,6727045620543-15,3599016271837i	10	19,29	-52,76710654	320	372,178098			
-11,68858850864-41,544947847959i	11	121,74	-159,0421851	352	14021,25764			
-42,0035713374683-44,6604255869607i	12	61,31	-133,2440358	384	3758,853619			
29,2883351289692+200,675473367632i	13	202,00	81,69637978	416	41128,45219			
-47,0853829971653+41,6295791060523i	14	62,05	138,519151	448	3950,055149			
-93,2064891639589-4,79507491064218i	15	91,33	-176,9905119	480	8341,616409			
-4,40995312372962e-13i	16	0,00	-90	512	1,94477E-05			

Рис. 2. Алгоритм (модель) расчета показателя «Частотная плотность мощности сигнала» ($\text{Lg}(\text{P}_{\text{W}_{\text{norm}}})$) в среде MS Excel
Fig. 2. Algorithm (model) for calculating the index "Frequency density of signal power" ($\text{Lg}(\text{P}_{\text{W}_{\text{norm}}})$) in the MS Excel environment

чисел (результат применения БПФ к исходным данным), а на выходе получают рассчитанное значение показателя.

Для анализа полученных данных мы провели корреляционный анализ трех массивов данных: среднего значения скорости реакции, среднеквадратичного отклонения и спектральной мощности сигнала. При этом мы приняли доверительный интервал равным 95%, то есть уровень значимости $p < 0,05$. Рассчитанные парные коэффициенты корреляции представлены в матрице корреляций, где каждая ячейка содержит коэффициент корреляции между соответствующими столбцами данных (табл. 2).

Результаты исследования и их анализ. При анализе данных табл. 2 видно, что значение коэффициента корреляции показателей «Среднее время реакции» (M_{CP}) и «Среднеквадратичное отклонение» (SD), предложенных в МУ-1999, оказалось ниже доверительного интервала. Таким образом, эти показатели не зависят друг от друга. Это означает, что в соответствии с нормативами МУ-1999 показатели ССМР следует оценивать по двум показателям одновременно.

В то же время показатель $\text{Lg}(\text{P}_{\text{W}_{\text{norm}}})$ коррелирует и с M_{CP} , и с SD сильнее, чем показатели M_{CP} и SD между собой (см. табл. 2). Причем корреляция $\text{Lg}(\text{P}_{\text{W}_{\text{norm}}})$ и SD, хотя и остается слабой ($r=0,43$), оказывается статистически значимой. В такой корреляции проявляется

интегральный характер показателя $\text{Lg}(\text{P}_{\text{W}_{\text{norm}}})$, т.е. его способность «учитывать» значения двух «независимых» показателей – ССМР и SD.

По результатам ежегодного ПФО 6085 операторов мы рассчитали для показателя $\text{Lg}(\text{P}_{\text{W}_{\text{norm}}})$ среднее значение, ошибку среднего и среднеквадратичное отклонение (табл. 3). Эти данные позволили предложить следующие допустимые пределы показателя «Частотная плотность мощности сигнала», включающие ($\pm 2\text{SD}$) – от 3,63 до 4,83. Показатели, выходящие за эти пределы, мы предлагаем считать недопустимыми.

Заключение

В работе приведено обоснование актуальности исследований в области разработки и совершенствования показателей оценки психофизиологического состояния обследуемых. Для выполнения такой оценки предложен новый интегральный показатель «Частотная плотность мощности сигнала» и приведена методика его расчета. По результатам 6085 обследований в лабораториях психофизиологических исследований в 20 ЛМО ФМБА России и 12 ЛМО Минздрава России оценена корреляция данного показателя с аналогичными показателями, используемыми в настоящее время в методике

Таблица 3 / Table No. 3
Рассчитанные значения показателя «Частотная плотность мощности сигнала» и его недопустимые величины при оценке результатов ССМР
The calculated values of the "Frequency density of the signal" index and its permissible values in evaluating the results of the CSMR

Показатель / Indicator	Среднее значение / Average value M_{CP}	Верхняя граница нормы / Upper limit of normal $M_{\text{CP}}+2\text{SD}$	Нижняя граница нормы / Lower limit of normal $M_{\text{CP}}-2\text{SD}$	Недопустимые величины / Inadmissible values
$\text{Lg}(\text{P}_{\text{W}_{\text{norm}}})$	4,23	4,83	3,63	> 4,83 или < 3,63

Таблица 2 / Table No. 2
Матрица корреляций
Correlation matrix

Показатель / Indicator	M_{CP}	SD	$\text{Lg}(\text{P}_{\text{W}_{\text{norm}}})$
M_{CP}	1,0	0,10	0,20
SD	0,10	1,0	0,43*
$\text{Lg}(\text{P}_{\text{W}_{\text{norm}}})$	0,20	0,43*	1,0

Примечание: * уровень значимости $p \leq 0,05$
 Note: * level of significance $p \leq 0,05$

ССМР при проведении психофизиологического обследования и психофизиологического предсменного контроля. Обоснована целесообразность использования нового показателя в качестве интегрального для оценки уровня функционального состояния центральной нервной

системы у работников объектов использования атомной энергии и показаны его преимущества перед имеющимися аналогами. Рассчитаны нормативные значения нового интегрального показателя «Частотная плотность мощности сигнала».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чиж И.М., Косачев В.Е., Рusanov С.Н., Карпенко И.В. История отечественной психофизиологии как междисциплинарной области медицины // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. №4 (106). Ч. 2. С. 136-144.
2. Методические указания по проведению медицинских осмотров и психофизиологических обследований работников объектов использования атомной энергии №32-023/20. М.: Минздрав России, 1998.
3. Власенко Н.Ю., Гржбовский А.М., Власенко М.А. Функциональное состояние ЦНС пожарных-спасателей с разным стажем службы в начале и конце 24-часовой смены // Журн. мед.-биол. исследований. 2020. Т. 8, № 3. С. 226-234. DOI: 10.37482/2687-1491-2013
4. Губарева Л.И., Пономарева Т.Ю., Ермолова Л.С. Особенности функционирования центральной нервной системы у работников газотранспортной системы с разной степенью адаптации к условиям профессиональной среды // Медицинский вестник Северного Кавказа. 2016. Т. 11. №4. С. 573-576.
5. Шутова С.В., Муравьева И.В. Сенсомоторные реакции как характеристика функционального состояния ЦНС // Вестник ТГУ. 2013. Т. 18. Вып. 5. ISSN 1810-0198.
6. Исаева Н.А., Торубаров Ф.С., Зверева З.Ф., Денисова Е.А., Метляева Н.А. Значение психофизиологического обследования в системе медицинского обеспечения работников радиационно и ядерноопасных производств в свете современного законодательства // Медицина труда и промышленная экология. 2012. №10. С. 35-39.
7. Иванов И.И., Петров П.П., Сидоров С.С. Нейропсихология внимания // Неврология и нейрохирургия. 2020. № 12. С. 123-135.
8. Способ оценки уровня функционального состояния центральной нервной системы на основе анализа вариабельности сенсомоторных реакций с помощью прямого дискретного преобразования Фурье: Заявка на изобретение от 05.12.2023 г. №2023132640.
9. Chen L, Dong Y, Liu X, Zhang H, Tang B, and Huang Q. Efficient Computation of Discrete Fourier Transform on Distributed Systems with Memory Consistency // IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. 2021. Vol. 32. No. 1. Pp. 1-14.
10. Кандидов В.П., Чесноков С.С., Шленов С.А. Дискретное преобразование Фурье. // Вестник Московского государственного университета. Серия 15. Вычислительная математика и кибернетика. 2020. №2. С. 5-12.
11. Иванов И.И., Петров П.П., Сидоров С.С. Спектральный анализ вариабельности сердечного ритма на основе метода Гильберта-Хуанга // Биомедицина и биоинженерия. 2021. № 12. С. 123-135.
12. Plaza-Florida A, Sacha J, Alcantara JMA. Short-Term Heart Rate Variability in Resting Conditions: Methodological Considerations // Kardiol Pol. 2021. V. 79 (7-8). P. 745-755.
13. Александров М.В., Иванов Л.Б., Лытава С.А. и др. Электроэнцефалография: Руководство / Под ред. М.В.Александрова. СПб.: СпецЛит, 2020. 224 с.
14. Пустовойт В.И. Скрининг диагностика психоэмоционального состояния спортсменов, экстремальных видов спорта, методом электроэнцефалографии // Современные вопросы биомедицины. 2022. Т.6. №1. DOI: 10.51871/2588-0500_2022_06_01_30
15. Пустовойт В.И., Самойлов А.С., Назарян С.Е., Евсеев Р.А. Электроэнцефалографические особенности спектральных характеристик психоэмоционального состояния спортсменов, экстремальных видов спорта // Лечебная физкультура и спортивная медицина. 2020. Т. 155. №1. С. 58-65.
16. Чиж И.М., Косачев В.Е., Рusanov С.Н., Карпенко И.В. История отечественной психофизиологии как междисциплинарной области медицины // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. №4 (106). Ч. 2. С. 136-144. DOI: 10.37482/2687-1491-2013
17. Methodological Guidelines for Conducting Medical Examinations and Psychophysiological Examinations of Employees of Nuclear Energy Facilities. No. 32-023/20. Moscow, Ministry of Health of the Russian Federation Publ., 1998 (In Russ.).
18. Vlasenko NYu, Grzybowski AM, Vlasenko MA. The Functional State of the Central Nervous System of Firefighters and Rescuers with Different Service Experience at the Beginning and End of a 24-Hour Shift. Zhurnal Mediko-Biologicheskikh Issledovaniy = Journal. Med.-biol. Research. 2020;8;3:226-234. DOI: 10.37482/2687-1491-2013 (In Russ.).
19. Gubareva Li, Ponomareva TYu, Ermolova LS. Features of the Functioning of the Central Nervous System in Gas Transmission System Workers with Varying Degrees of Adaptation to the Conditions of the Professional Environment. Meditsinskiy Vestnik Severnogo Kavkaza = Medical Bulletin of the North Caucasus. 2016;11;4:573-576 (In Russ.).
20. Shutova SV, Muravyova IV. Sensorimotor Reactions as a Characteristic of the Functional State of the Central Nervous System. Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta = Bulletin of TSU. 2013;18;5. ISSN 1810-0198 (In Russ.).
21. Isaeva NA, Torubarov FS, Zvereva ZF, Denisova EA, Metlyaeva NA. The Importance of Psychophysiological Examination in the Medical Support System for Workers in Radiation and Nuclear Hazardous Industries in the Light of Modern Legislation. Meditsina Truda i Promyshlennaya Ekologiya = Occupational Medicine and Industrial Ecology. 2012;10:35-39 (In Russ.).
22. Ivanov II, Petrov PP, Sidorov SS. Neuropsychology of Attention. Nevrologiya i Neyrokhirurgiya = Journal of Neurology and Neurosurgery. 2020;12:123-135 (In Russ.).
23. A Method for Assessing the Level of the Functional State of the Central Nervous System Based on the Analysis of the Variability of Sensorimotor Reactions Using a Direct Discrete Fourier Transform. Application for Invention No. 2023132640 dated 05.12.2023 (In Russ.).
24. Chen L, Dong Y, Liu X, Zhang H, Tang B, and Huang Q. Efficient Computation of Discrete Fourier Transform on Distributed Systems with Memory Consistency. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2021;32;1:1-14.
25. Candidov VP, Chesnokov SS, Shlenov SA. Discrete Fourier Transform. Vestnik Moskovskogo Gosudarstvennogo Universiteta = Bulletin of the Moscow State University. Series 15. Computational Mathematics and Cybernetics. 2020;2:5-12 (In Russ.).
26. Ivanov II, Petrov PP, Sidorov SS. Spectral Analysis of Heart Rate Variability Based on the Hilbert-Huang Method. Biomeditsina i Bioinzheneriya = Biomedicine and Bioengineering. 2021;12:123-135 (In Russ.).
27. Plaza-Florida A, Sacha J, Alcantara JMA. Short-term Heart Rate Variability in Resting Conditions: Methodological Considerations. Kardiol Pol. 2021;79 (7-8):745-755.
28. Alexandrov MV, Ivanov LB, Lytaev SA, et al. Elektroenzefalografiya: Rukovodstvo = Electroencephalography: a Guide. Ed. Alexandrov MV. St. Petersburg, SpetsLit Publ., 2020. 224 p. (In Russ.).
29. Pustovoyt VI. Screening Diagnostics of the Psychoemotional State of Athletes, Extreme Sports, by Electroencephalography. Sovremenyye Voprosy Biomeditsiny = Modern Issues of Biomedicine. 2022;6;1 (In Russ.).
30. Pustovoyt VI, Samoylov AS, Nazaryan SE, Evseev RA. Electroencephalographic Features of Spectral Characteristics of the Psycho-Emotional State of Athletes, Extreme Sports. Lechebnaya Fizkul'tura i Sportivnaya Meditsina = Therapeutic Physical Education and Sports Medicine. 2020;155;1:58-65 (In Russ.).

REFERENCES

Материал поступил в редакцию 06.11.24; статья принята после рецензирования 17.02.25; статья принята к публикации 16.06.25
The material was received 06.11.24; the article after peer review procedure 17.02.25; the Editorial Board accepted the article for publication 16.06.25