

УДК 629.78:612.821:004.932

ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ СРАВНЕНИЯ РЕЖИМОВ ИМИТАЦИИ ВЕСТИБУЛО-СЕНСОРНОГО КОНФЛИКТА НА ЦЕНТРИФУГЕ ЦФ-18

А.И. Липко, А.П. Кручинина, И.Н. Гаврик

А.И. Липко; канд. физ.-мат. наук, доц. А.П. Кручинина
(МГУ имени М.В. Ломоносова)
И.Н. Гаврик (ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

Разработка эффективных методов подготовки космонавтов к условиям неблагоприятных факторов космического полета требует объективных критериев оценки режимов тренировок на специализированных стендах, таких как центрифуга. В статье предложена методика объективного сравнения режимов движения на основе частотного анализа данных инерциальных датчиков. Метод включает сегментацию сигналов на квазиоднородные участки, спектральный анализ в октавных полосах (0,48–28,1 Гц), векторизацию в 108-мерное пространство спектральных признаков инерциальных сигналов и последующую кластеризацию с использованием косинусной метрики. Методика апробирована на данных, полученных в четырех разных исследованиях: на центрифуге ЦФ-18, в космическом эксперименте «Вектор-МБИ-1» на борту МКС, в условиях кратковременной невесомости на самолете-лаборатории Ил-76МДК и при повседневной двигательной активности испытуемого. Результаты демонстрируют устойчивую группировку режимов по спектральным характеристикам и статистически значимую корреляцию между принадлежностью к определенным группам и частотой субъективных оценок симптомов болезни движения. Показано, что метод позволяет выявлять режимы движения кабины центрифуги, наиболее близкие к эталонным состояниям (например, к комфортному движению) и наиболее удаленные от комфортного. Такой подход позволит выявлять потенциально наиболее соответствующие требованиям режимы, например для тренировки вестибулярной устойчивости. Предложенный инструмент предоставляет объективную основу для оптимизации реализаций протоколов имитации вестибуло-сенсорного конфликта.

Ключевые слова: космическая болезнь движения, вестибуло-сенсорный конфликт, центрифуга ЦФ-18, инерциальные датчики, спектральный анализ, частотные октавы, кластеризация, объективная оценка, подготовка космонавтов

Frequency Analysis of Inertial Data for Comparing the Modes of Simulation of Vestibular Sensory Conflict at the Centrifuge TsF-18 Unique Scientific Facility. A.I. Lipko, A.P. Kruchinina, I.N. Gavrik

The development of effective methods for cosmonauts' training for the adverse factors of space flight requires objective criteria for evaluating training modes at specialized facilities such as a centrifuge. The article proposes a method for an

objective comparison of motion modes based on the frequency analysis of inertial sensor data. The method includes segmentation of signals into quasi-homogeneous sections, spectral analysis in octave bands (0,48–28,1 Hz), vectorization into a 108-dimensional space of spectral features of inertial signal, and subsequent clustering using a cosine metric. The technique has been tested on data obtained in four different studies: on the TsF-18 centrifuge, in the Vektor-MBI-1 space experiment aboard the ISS, in short-term weightlessness on the Il-76 MKD laboratory aircraft, and during the tester's daily motion activity. The results demonstrate a stable grouping of modes by spectral characteristics and a statistically significant correlation between belonging to a certain group and the frequency of subjective assessments of motion sickness symptoms. It is shown that the method makes it possible to identify the center cabin motion modes that are the closest ones to the reference states, for example, to a comfortable motion, and the most remote ones from a comfortable motion. This approach will make it possible to identify potentially the most appropriate modes, for example, for vestibular resistance training. The proposed tool provides an objective basis for optimizing the implementation of protocols for simulating vestibule-sensory conflict.

Keywords: space motion sickness, vestibular sensory conflict, TsF-18 centrifuge, inertial sensors, spectral analysis, frequency octaves, clustering, objective assessment, cosmonaut training

Космическая болезнь движения (КБД) остается одной из актуальных медицинских проблем пилотируемой космонавтики, особенно в начальный период адаптации к невесомости [1, 2]. В настоящее время ведущей концепцией, объясняющей механизмы возникновения КБД, является теория вестибуло-сенсорного конфликта, связывающая развитие симптомов с рассогласованием информации, поступающей от вестибулярной, зрительной и проприоцептивной систем [3, 4]. В связи с этим для подготовки космонавтов к работе в условиях сенсорного рассогласования широко применяются наземные технические средства, позволяющие воспроизводить контролируемые гравитационно-инерционные воздействия. Одним из таких тренажеров является уникальная научная установка «Центрифуга ЦФ-18» – УНУ «ЦФ-18» (зарегистрирована в каталоге научно-технологической инфраструктуры РФ – «Центр коллективного пользования научным оборудованием и уникальные научные установки» ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт экономики, политики и права в научно-технической сфере» под номером № 4142822), на которой используются различные реализации алгоритма имитации сенсорного конфликта в невесомости [5].

В рамках настоящего исследования использовались данные, полученные в ходе эксперимента по сквозному моделированию факторов космического полета на центрифуге УНУ «ЦФ-18» [6]. Эксперимент включал непрерывное 60-минутное вращение, имитирующее три ключевых этапа полета:

– выведение на орбиту (с воспроизведением профиля перегрузок пилотируемого корабля «Союз МС»);

- орбитальный полет (моделирование вестибуло-сенсорного конфликта в условиях антиортостатической позы);
- спуск на Землю.

Все этапы проводились без остановки центрифуги, что позволило получить инерциальные данные для комплексного анализа переходных и установившихся режимов.

Воспроизведение описанного алгоритма на центрифуге ЦФ-18 сопряжено с рядом технических трудностей, обусловленных особенностями работы систем управления приводами и повышенными требованиями к энергетическим и ресурсным затратам, необходимым для реализации длительных режимов вращения. Кроме того, формирование выраженных симптомов болезни движения, связанных с конфликтом информации от полукружных каналов и отолитовых органов вестибулярного аппарата [1, 5], зависит от параметров конкретного режима вращения. Получаемый эффект воздействия, помимо ограниченного набора объективных медицинских показателей, в значительной степени оценивается по субъективным ощущениям испытуемых. Такая оценка требует проведения большого числа длительных сеансов вращения центрифуги для получения статистически значимых результатов при сравнении режимов. Это обуславливает необходимость разработки объективных количественных методов, позволяющих сопоставлять различные режимы вращения по характеру их воздействия на сенсорные системы человека. Применение подобных методов позволяет не только ранжировать существующие режимы по вероятности провокации вестибуло-сенсорного конфликта, но и осуществлять систематическое сравнение различных типов движения человека.

Целью данного исследования являлась разработка и апробация методики объективного сравнения режимов движения человека на основе частотного анализа данных инерциальных датчиков. Основная гипотеза заключалась в том, что спектральные характеристики сигналов с акселерометров и гироскопов, коррелирующих с информацией, воспринимаемой вестибулярным аппаратом [4, 5], несут уникальную «подпись» типа движения и могут быть использованы для его классификации и сравнения.

Методика

Этические аспекты. Исходные данные, использованные в исследовании, были получены в рамках ранее проведенных экспериментов, одобренных локальными биоэтическими комиссиями соответствующих организаций. Все участники предоставили информированное письменное согласие. Обработка данных проводилась анонимно.

Материалы и данные. В работе использовались данные с трехосевых акселерометров и гироскопов (частоты дискретизации 400–1666 Гц), закрепленных на голове испытуемых. Анализировались три основных массива данных:

– центрифуга ЦФ-18: 63 записи, полученные при сквозном моделировании этапов космического полета (выведение, орбитальный полет, спуск), включающие режимы с тангенциальной и радиальной посадкой испытуемого при моделировании орбитального полета;

– космический эксперимент (КЭ) «Вектор-МБИ-1»: 64 записи с МКС и фоновые записи до и после полета, включающие повседневную деятельность и бег на беговой дорожке [6];

– эталонные и повседневные движения: записи кратковременной невесомости, полученные на летающей лаборатории Ил-76МДК [7], а также 42 записи повседневной активности (поездки на транспорте, вращение в кресле Барани, полет на самолете).

В рамках вращений на ЦФ-18 и в КЭ «Вектор-МБИ-1» использовался носимый регистратор ускорений – устройство на базе шестикомпонентного инерциального сенсора. Устройство обеспечивало измерение и запись линейных ускорений и угловых скоростей в районе лба обследуемого в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Используемая частота составила 1666 Гц, диапазон регистрируемых значений:

– акселерометра: $\pm 20 \text{ м/с}^2$ с абсолютной погрешностью $\pm 0,001 \text{ м/с}^2$;

– гироскопа: $\pm 300 \text{ град/с}$ абсолютной погрешностью $\pm 0,8 \text{ град/с}$.

Для регистрации данных повседневных движений использовался встроенный сенсор мобильного телефона с частотой обновления данных 400 Гц.

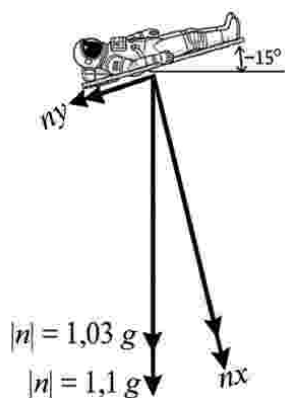


Рис. 1. Проекция перегрузки при вращении центрифуги

Экспериментальные режимы вращения.

В анализируемом наборе данных использованы результаты экспериментов, выполненных на центрифуге ЦФ-18. Испытатель во время сеанса размещался в левом штатном кресле кабины в положении лежа с выпрямленными бедрами и коленями (в полный рост). Кресло устанавливалось под углом 105° к направлению вектора силы тяжести (-15° относительно плоскости, перпендикулярной вектору силы тяжести).

Каждый испытуемый проходил два режима вращения; продолжительность воздействия в каждом режиме составляла 40 мин. В обоих режимах, помимо основного вращения центрифуги, реализовывались компенсаторные периодические вращения элементов карданного подвеса, формирующие дополнительные угловые движения.

С точки зрения воздействия на вестибулярный аппарат режимы различались ориентацией проекций угловых скоростей на полукружные каналы вестибулярного аппарата, что определяло характер вестибуло-сенсорного конфликта.

Режим 1. Кресло испытателя ориентировано по направлению тангенциальной составляющей ускорения; продольная ось тела совпадала с направлением движения консоли. Наибольшие угловые скорости формировались в сагиттальной плоскости и соответствовали движениям, аналогичным кивкам головы вверх-вниз.

Режим 2. Кресло испытателя ориентировано по направлению центростремительного ускорения; продольная ось тела располагалась перпендикулярно направлению движения консоли. Максимальные угловые скорости наблюдались во фронтальной плоскости и соответствовали движениям, аналогичным покачиваниям головы вправо-влево.

В обоих режимах на центрифугу подавались управляющие сигналы, обеспечивающие движение консоли центрифуги по гармоническому закону с заданной частотой и угловой скоростью, а также поддержание постоянно-го направления (-15°) результирующего вектора перегрузки по отношению к креслу испытателя в кабине центрифуги за счет непрерывных поворотов на расчетные углы кабины по крену и тангажу.

Управляющие сигналы формировались программами, разработанными в российской среде динамического моделирования SimIn Tech, работающими в реальном времени и позволяющими оперативно менять параметры управления центрифугой во время исследований.

Параметры вращения центрифуги, зарегистрированные датчиками в режимах 1 и 2, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения параметров вращения центрифуги, зарегистрированные датчиками в режимах 1 и 2

Диапазоны	Режимы, $f = 0,14$ Гц	
	1	2
Gr, ед. (радиальная)	0,2 ÷ 0,7	0,2 ÷ 0,7
At, ед. (тангенциальная)	-0,23 ÷ 0,23	-0,23 ÷ 0,23
$ n $, ед.	1,02 ÷ 1,22	1,02 ÷ 1,22
n_x , ед.	0,98 ÷ 1,19	1,00 ÷ 1,20
n_y , ед.	-0,33 ÷ 0,23	-0,27 ÷ 0,22
n_z , ед.	-0,04 ÷ 0,00	-0,06 ÷ 0,02
уск. $d\omega_x$, гр./с ²	-4,2 ÷ 5,2	-3,7 ÷ 4,6
уск. $d\omega_y$, гр./с ²	-8,79 ÷ 10,0	-10,8 ÷ 11,0
уск. $d\omega_z$, гр./с ²	-12,4 ÷ 12,6	-11,2 ÷ 9,4

Предварительная обработка и сегментация. Длинные записи сегментировались на квазиоднородные участки. Участок считался квазиоднородным, если для всех его подынтервалов выполнялось условие спектральной стабильности [7]: расстояние между спектральными плотностями мощности (СПМ) $S_{i(f)}$ и $S_{j(f)}$ не превышало эмпирически подобранного порога ε ($\varepsilon \approx 0,3$):

$$d(S_i(f), S_j(f)) < \varepsilon. \quad (1)$$

Спектральный анализ и векторизация. Для каждого выделенного участка оценивалась СПМ в диапазоне 0,48–28,1 Гц. Диапазон был разбит на 18 октавных полос в соответствии с принципами анализа воздействия вибраций на человека ¹ [8, 9]. Для оценки СПМ на разных участках применялся метод Уэлча [9].

Для каждой из 6 осей датчика (3 – акселерометра и 3 – гироскопа) вычислялась доля мощности сигнала, приходящаяся на каждую октавную полосу: отношение площади под графиком мощности спектра в частотном диапазоне $[f_1, f_2]$ к аналогичной площади во всем диапазоне $[f_0, f_n]$, где $f_0 = 0,48$ Гц – наименьшее значение, $f_n = 28,1$ Гц – максимальное значение частоты в диапазоне. Таким образом, каждый однородный участок представлялся в виде 108-мерного вектора v :

$$v = [a_1^1 \dots a_1^{18}, a_2^1 \dots a_2^{18}, a_3^1 \dots a_3^{18}, g_1^1 \dots g_1^{18}, g_2^1 \dots g_2^{18}, g_3^1 \dots g_3^{18}], \quad (2)$$

где a_k^j, g_k^j – нормированные спектральные мощности для акселерометра и гироскопа по оси k в полосе j (табл. 2).

Таблица 2

Границы частотных интервалов

Границы интервалов	1	2	3	4	5	6	7	8	9
f_1 , Гц	0,48	0,56	0,71	0,89	1,12	1,41	1,79	2,24	2,81
f_2 , Гц	0,56	0,71	0,89	1,12	1,41	1,79	2,24	2,81	3,55
Границы интервалов	10	11	12	13	14	15	16	17	18
f_1 , Гц	3,55	4,47	5,61	7,1	8,9	11,2	14,1	17,9	22,4
f_2 , Гц	4,47	5,61	7,1	8,9	11,2	14,1	17,9	22,4	28,1

Метрики сравнения и кластеризация. Для сравнения векторов использовались метрики косинусного сходства (3), коэффициента Пирсона и евклидова расстояния. Косинусное сходство, инвариантное к амплитуде сигнала, было выбрано в качестве основной метрики для кластеризации [10]:

$$d_{\cos(v_i, v_j)} = 1 - \frac{(v_i \cdot v_j)}{\|v_i\| \cdot \|v_j\|}. \quad (3)$$

¹ ГОСТ Р 70024.1–2022. Государственная система обеспечения единства измерений. Фильтры полосовые октавные и на долю октавы. Часть 1. Технические требования = State system for ensuring the uniformity of measurements. Octave-band and fractional-octave-band filters. Part 1. Specifications: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие с 01.01.2023. – Москва: Росстандарт, 2022. – Срок действия не ограничен.

Кластеризация проводилась алгоритмом k -средних [11]. Для оценки качества кластеризации использовался критерий суммы квадратов расстояний внутри кластеров (Within-Cluster Sum of Squares, WCSS), вычисляемой по формуле:

$$WCSS = \sum_{C_k}^{C_n} \left(\sum_{d_i \in C_i}^{d_m} \text{distance}(d_i, C_k)^2 \right),$$

где C – это векторы кластерных центров (они – результат работы метода k -средних); d – векторы в каждом кластере, distance – выбранная норма.

Минимизация WCSS отражает стремление к компактным, хорошо разделенным кластерам. В работе для определения оптимального числа кластеров K применялся метод «локтя» (elbow method) по графику зависимости WCSS от K и минимизация силуэтного коэффициента [12].

Результаты и обсуждение

Спектральные характеристики различных режимов. Анализ показал, что разные типы движений обладают уникальными спектральными «портретами». На рис. 2 представлены усредненные спектральные векторы для ключевых режимов центрифуги ЦФ-18. Видно, что режимы с разным характером посадки (тангенциальная, радиальная) и этапы сквозного моделирования демонстрируют различное распределение энергии по октавным полосам.

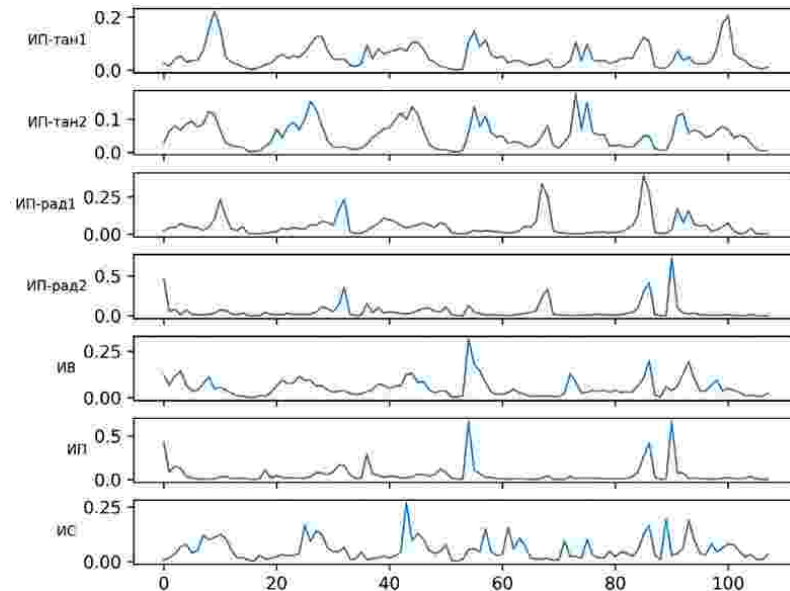


Рис. 2. Усредненные спектральные векторы (первые 54 компоненты – акселерометр) для различных режимов центрифуги ЦФ-18:

ИП-тан 1/2 – имитация полета с тангенциальной посадкой; ИП-рад 1/2 – с радиальной посадкой; ИВ – имитация выведения; ИС – имитация спуска

Результаты кластеризации. Применение алгоритма кластеризации ко всему массиву данных позволило выявить устойчивые группы схожих режимов. Визуализация в пространстве первых двух главных компонент (объясняющих ~60 % дисперсии) представлена на рис. 3. Ключевым наблюдением стало формирование компактного кластера, содержащего все записи повседневной деятельности на Земле и МКС. Это подтверждает базовую адекватность метода: режимы, не связанные с выраженным сенсорным конфликтом, были корректно сгруппированы [3, 5].

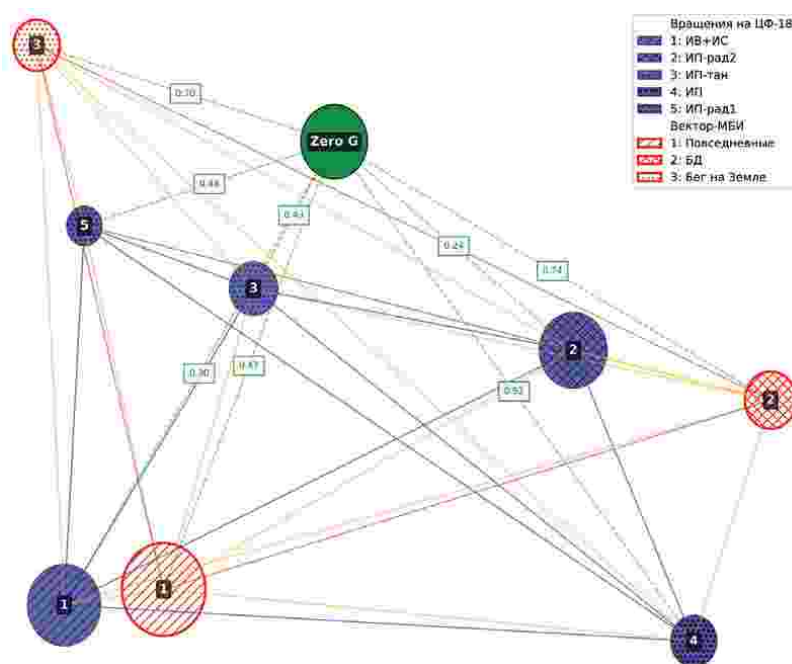


Рис. 3. Результаты кластеризации данных ЦФ-18 и КЭ «Вектор-МБИ-1» в пространстве главных компонент

В кластер повседневной активности также вошли записи, полученные с использованием встроенных инерциальных датчиков мобильного телефона при поездках в транспорте и контролируемых вращениях. Несмотря на меньшую частоту дискретизации и бытовой характер датчика, такие записи корректно сгруппировались с фоновыми режимами, не вызывающими выраженного сенсорного конфликта (рис. 4). Это демонстрирует состоятельность метода и его устойчивость к типу измерительного устройства, при сохранении доминирующей роли данных, полученных на центрифуге ЦФ-18.

Особый интерес представляли режимы, максимально удаленные от кластера повседневности. К ним относятся:

- кластер режимов с тангенциальной посадкой на ЦФ-18;
- кластер, содержащий записи кратковременной невесомости с Ил-76;

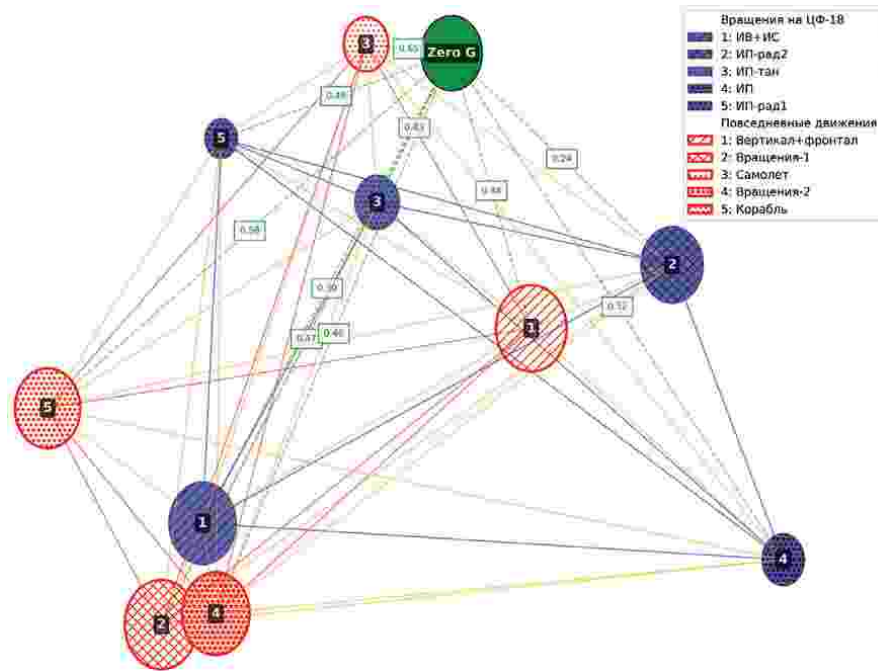


Рис. 4. Результаты кластеризации данных ЦФ-18 и записей повседневных движений с мобильного телефона в пространстве главных компонент

– изолированный кластер, содержащий исключительно записи бега на тренажере БД-2 на МКС.

Последний результат имеет важное методологическое значение. Режим бега в невесомости, при котором нагружение бегуна происходит за счет сил упругости притяжения [2, 7], является уникальным и не имеет аналогов в наземных условиях. Выделение алгоритмом этого режима движения в отдельный кластер служит независимым подтверждением чувствительности и специфичности предложенного метода.

Корреляция с субъективными оценками. Для проверки гипотезы о связи спектральной «подписи» с физиологическим ответом была проанализирована частота жалоб на симптомы КБД в разных кластерах. Данные сведены в табл. 3. Наблюдается четкая корреляция случаев жалоб на симптомы болезни движения (тошнота, головокружение, дискомфорт) в двух кластерах: при тангенциальной посадке на ЦФ-18 и кратковременная невесомость. Отметим, что кратковременную невесомость можно считать эталонным режимом [13, 14] с максимально выраженным вестибуло-сенсорным конфликтом. Статистически значимое различие ($p < 0,05$ по критерию χ^2) в распределении жалоб между кластерами подтверждает, что предложенная методика не только группирует данные по формальным признакам, но и выявляет режимы с наибольшим провоцирующим потенциалом [13].

Таблица 3

**Распределение записей и субъективных жалоб
на симптомы КБД по основным кластерам**

Кластер (основное содержание)	Количество записей		
	экспериментов	жалоб	жалоб, %
Повседневная активность (Земля / МКС)	34	–	–
Бег на БД-2 (МКС)	13	–	–
ЦФ-18: радиальная посадка, имитация полета	31	2	6,5
ЦФ-18: тангенциальная посадка	12	7	58,3
Кратковременная невесомость (Ил-76МДК)	12	9	75,0

Сравнение с эталоном. Кратковременная невесомость была использована в качестве эталонного состояния с максимально выраженным укачиванием. Расчет средних расстояний от центра кластера «невесомость» до центров остальных кластеров показал, что ближе всего к нему оказались режимы центрифуги с радиальной посадкой и этапы сквозного моделирования. Это указывает на то, что данные режимы спектрально наиболее похожи на состояние, вызывающее сильный сенсорный конфликт (табл. 4, 5).

Таблица 4

Распределение записей по кластерам (ЦФ-18)

№ кластера	1	2	3	4	5
Диаметр кластера	D = 0,64	D = 0,51	D = 0,59	D = 0,39	D = 0,30
Число записей (реализаций) в кластере					
ИП-тан1	2	–	3	–	1
ИП-тан2	4	–	2	–	–
ИП-рад1	–	2	–	–	7
ИП-рад2	–	9	–	–	–
ИВ	11	–	–	–	–
ИП	2	–	–	9	–
ИС	11	–	–	–	–

Таблица 5

Распределение записей по кластерам (Вектор-МБИ)

№ кластера	1	2	3	4
Диаметр кластера	D = 0,57	D = 0,49	D = 0,24	D = 0,29
Число записей (реализаций) в кластере				
Повседневная активность (Земля)	14	–	–	–
Повседневная активность (МКС)	20	–	–	–
Бег на БД-2 (МКС)	–	1	1	11
Бег (Земля, испытуемый А)	1	–	7	–
Бег (Земля, испытуемый Б)	1	6	1	1

Выводы

Разработана и апробирована методика объективного сравнения режимов движения на основе частотного анализа инерциальных данных. Метод включает сегментацию, спектральный анализ в октавных полосах, векторизацию и кластеризацию.

Показана применимость метода: алгоритм корректно выделяет в отдельные кластеры принципиально разные типы движений (повседневная активность, уникальный бег в невесомости на БД-2, особые режимы).

На имеющейся выборке данных установлена статистически значимая корреляция между принадлежностью режима к определенному спектральному кластеру и частотой возникновения субъективных симптомов болезни движения. Режимы с тангенциальной посадкой на центрифуге ЦФ-18 и кратковременная невесомость формируют кластеры с максимальной концентрацией жалоб.

Методика позволяет количественно оценивать «удаленность» любого режима от эталонного состояния (например, невесомости) и от фоновой повседневной активности. Это создает основу для ранжирования режимов по силе вызываемого вестибуло-сенсорного конфликта.

Изложенный метод предлагается для объективной оценки и оптимизации протоколов тренировок на центрифуге. Метод позволяет выделять «оптимально сложные» режимы, например, достаточно удаленные от привычной активности или максимально «приближенные» к эталонному.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Корнилова, Л.Н. Вестибулярная система. Межсенсорное взаимодействие. Пространственное восприятие и ориентация в пространстве. Космический адаптационный синдром и космическая болезнь движения / Л.Н. Корнилова, В. Григорова, Х. Мюллер // Орбитальная станция «Мир». – 2002. – № 2. – С. 208–252. Kornilova, L.N. Vestibular System. Intersensory Interaction. Spatial Perception and Orientation in Space. Space Adaptation Syndrome and Space Motion Sickness / L.N. Kornilova, V. Grigorova, H. Muller // Mir Space Station. – 2002. – No 2. – P. 208–252 (in Russian).
2. Oman, C.M. Brainstem Processing of Vestibular Sensory Exafference: Implications for Motion Sickness Etiology / C.M. Oman, K.E. Cullen // Experimental Brain Research. – 2014. – Vol. 232. – No 8. – P. 2483–2492.
3. Thornton, W.E. Space Motion Sickness and Motion Sickness: Symptoms and Etiology / W.E. Thornton, F. Bonato // Aviation, Space, and Environmental Medicine. – 2013. – Vol. 84. – No 7. – P. 716–721.
4. Bertolini, G. Moving in a Moving World: A Review on Vestibular Motion Sickness / G. Bertolini, D. Straumann // Frontiers in Neurology. – 2016. – Vol. 7. – 14 p.
5. Влияние афферентации различных сенсорных входов на отолито-окулярный рефлекс в условиях реальной и моделируемой невесомости / И.А. Наумов, Л.Н. Корнилова, Д.О. Глухих [и др.] // Физиология человека. – 2021. – Т. 47, № 1. – С. 84–93.

- The Effect of Afferentation of Various Sensory Inputs on the Otolithocular Reflex in Real and Simulated Weightlessness / I.A. Naumov, L.N. Kornilova, D.O. Glukhykh [et al.] // *Human Physiology*. – 2021. – Vol. 47, No 1. – P. 84–93 (in Russian).
6. Исследование функционального состояния космонавтов в процессе сквозного моделирования этапов космического полета на центрифуге ЦФ-18 / К.С. Киреев, А.С. Заверюха, Н.В. Власова, Я.Ю. Миняйло [и др.] // *Пилотируемые полеты в космос*. – № 2(51). – 2024. – С. 63–78.
- Investigation of the Cosmonauts' Functional State in the Process of End-to-End Modeling of Space Flight Stages on the TsF-18 Centrifuge / K.S. Kireev, A.S. Zaveryukha, N.V. Vlasova, Ya.Yu. Minyailo [et al.] // *Manned Spaceflight*. – No 2(51). – 2024. – P. 63–78 (in Russian).
7. Кручинина, А.П. Спектральный анализ показаний инерциального блока при биомеханических исследованиях / А.П. Кручинина, М.М. Янкова // XVIII конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования»: Сборник трудов под ред. А.М. Садовского. – Москва: ИКИ РАН, 2021. – С. 53–62.
- Kruchinina, A.P. Spectral Analysis of Inertial Block Readings in Biomechanical Research / A.P. Kruchinina, M.M. Yankova // XVIII Conference of Young Scientists “Fundamental and Applied Space Research”. Collection of Works ed. by A.M. Sadovsky. – Moscow: IKI RAS, 2021. – P. 53–62 (in Russian).
8. Земсков, М.А. Использование цифровой обработки сигналов и корреляционного анализа выявления условий возникновения болезни движения человека / М.А. Земсков, А.П. Кручинина // *Фундаментальные и прикладные задачи механики. Материалы международной научной конференции. Том. Часть 1.* – Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2021. – С. 136–142.
- Zemskov, M.A. The Use of Digital Signal Processing and Correlation Analysis to Identify the Conditions of Human Motion Sickness / M.A. Zemskov, A.P. Kruchinina // *Fundamental and Applied Problems of Mechanics. Materials of the International Scientific Conference. Vol. Part 1.* – Moscow: Bauman Moscow State Technical University (National Research University), 2021. – P. 136–142 (in Russian).
9. Welch, P.D. The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: a Method Based on Time Averaging over Short, Modified Periodograms // *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*. – 1967. – Vol. 15, No 2. – P. 70–73.
10. Кручинина, А.П. Исследование частотных характеристик движения человека в космическом эксперименте «Вектор-МБИ-1» / А.П. Кручинина, П.А. Кручинин, Р.Р. Каспранский // *Fundamental and Applied Problems of Mechanics (FAPM-2023)*. – 2023. – С. 55–59.
- Kruchinina A.P., Kruchinin P.A., Kaspransky R.R. Investigation of the Frequency Characteristics of Human Movement in the Vector-MBI-1 Space Experiment / A.P. Kruchinina, P.A. Kruchinin, R.R. Kaspransky // *Fundamental and Applied Problems of Mechanics (FAPM-2023)*. – 2023. – P. 55–59 (in Russian).
11. Arthur, D. K-means++: the Advantages of Careful Seeding / D. Arthur, S. Vassilvitskii // *Proceedings of the Eighteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*. – 2007. – P. 1027–1035.

12. Kaufman, L. Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis / L. Kaufman, P.J. Rousseeuw. – Wiley-Interscience, 1990. – 368 p.
13. Биомехатроника – космические исследования / В.В. Александров, С.С. Лемак, К.В. Тихонова [и др.] // Пилотируемые полеты в космос. – 2023. – № 4(49). – С. 77.
Biomechatronics – Space Research / V.V. Alexandrov, S.S. Lemak, K.V. Tikhonova [et al.] // Manned Spaceflight. – 2023. – No 4(49). – 77 p. (in Russian).
14. Математические задачи динамической имитации аэрокосмических полетов / В.В. Александров, А.Ю. Ишлинский, В.А. Садовничий [и др.]. – Издательство Московского Университета, Москва, 1995. – 160 с.
Mathematical Problems of Dynamic Simulation of Aerospace Flights / V.V. Alexandrov, A.Yu. Ishlinsky, V.A. Sadovnichy [et al.]. – Moscow University Press, Moscow, 1995. – 160 p. (in Russian).