ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 91 за 2019 г.

ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

Воронина М.Ю., Лысова Н.Ю., Иванов Д.С., Орлов Ю.Н., Фомина Е.В.

Вариабельность локомоторных стратегий человека в условиях длительного космического полета

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Вариабельность локомоторных стратегий человека в условиях длительного космического полета / М.Ю.Воронина [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2019. № 91. 19 с. doi:10.20948/prepr-2019-91
URL: http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2019-91

О р д е н а Л е н и н а
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Р о с с и й с к о й а к а д е м и и н а у к

М.Ю. Воронина, Н.Ю. Лысова, Д.С. Иванов,
Ю.Н. Орлов, Е.В. Фомина

Вариабельность локомоторных стратегий человека в условиях длительного космического полета

Москва — 2019

Воронина М.Ю., Лысова Н.Ю., Иванов Д.С., Орлов Ю.Н., Фомина Е.В.

Вариабельность локомоторных стратегий человека в условиях длительного космического полета

Исследуются биометрические данные, получаемые с помощью датчика давления на опору при движении по ней человека, для получения выводов о состоянии или изменении его локомоторных функций с течением времени. Построены три типа индикаторов. Первый относится к уровню погрешности интегральных характеристик показаний датчиков. Второй оценивает изменение временной формы импульса давления за время отталкивания на протяжении тренировки. Третий относится к нестационарности временного ряда отклонений от формы импульса давления и показывает различия адаптационных возможностей организма в разных режимах движения.

Ключевые слова: анализ биометрических данных, локомоторные функции, невесомость

Voronina M.Yu., Lysova N.Yu., Ivanov D.S., Orlov Yu.N., Fomina E.V.

Variability of locomotor strategy of cosmonauts at different stages of long-term space flight

The paper investigates the possibility of using biometric data obtained with the help of a pressure sensor on the support when a person moves on it to obtain conclusions about the state or change of its locomotive functions over time. Three types of indicators are constructed. The first type of indicators shows the level of error of the integral characteristics of the sensor readings. The second type refers to the assessment of changes in the time form of the pressure pulse in one step during training. The third type is the index of unsteadiness of the time series of deviations, showing the differences in the adaptive capabilities of the organism in different modes of movement.

Keywords: biometric data analysis, locomotor function, weightlessness

Работа выполнена в рамках базовой темы РАН 63.1.

Содержание

1. Введение и постановка задачи 3
2. Анализ устойчивости нормировки паттерна 4
3. Анализ устойчивости формы паттерна 11
4. Анализ нестационарности ряда отклонений профиля давления от паттерна . 14
5. Оценка влияния неточности реализации протокола 17
6. Заключение..... 18
Список источников..... 19

1. Введение и постановка задачи

Концепция профилактики гипогравитационных нарушений для межпланетных миссий требует комплексного подхода к оценке глубины перестроек в различных физиологических системах организма. Целью данного исследования являлось изучение перестроек индивидуальных стратегий локомоций в течение длительной космической миссии и после ее завершения.

Рассматриваются биометрические данные, получаемые с помощью датчика давления на опору при движении по ней человека, для анализа изменения стратегии локомоций на различных этапах космического полета и после его завершения. Человеком в данном случае является космонавт, проводящий тренировки на беговой дорожке до полета, во время полета и после полета. Суть вопроса состоит в выявлении нестационарности во временном ряде показаний датчика давления, для чего требуется построить соответствующий набор индикаторов.

В исследовании использован тест «Индивидуальные стратегии», это 13 ступеней локомоций с чередованием медленной и быстрой ходьбы и переходом от ходьбы к бегу. Согласно протоколу теста, имеются три режима движения: режим 1 – медленная ходьба со средней скоростью 3 км/ч; режим 2 – быстрая ходьба со средней скоростью 6 км/ч; режим 3 – ступенчато-возрастающая нагрузка с ускорением 0,01 м/с^2 с увеличением скорости движения от 3 км/ч до 15 км/ч. В течение тренировки происходит десятикратное чередование медленной и быстрой ходьбы, а завершается тренировка ускоренным движением.

Тест «Индивидуальные стратегии» выполнялся за 30-60 суток до космического полета и на 8±3 сутки после полета. Регистрировались величины вертикальных составляющих опорных реакций с помощью тензодатчиков, установленных на бегущей дорожке. Отметим, что бегущая дорожка на МКС оборудована системой виброизоляции, так что выполнение локомоций на неустойчивой опоре является усложненной задачей.

Новизна предлагаемого теста для гравитационной физиологии состоит в применении регламентированной локомоторной нагрузки, позволяющей оценивать стратегии локомоций и вегетативное обеспечение мышечной деятельности в широком диапазоне скоростей.

Поскольку построение индикатора для идентификации какого-либо состояния в нестационарном временном ряде представляет собой задачу, не опирающуюся на какие-либо стандартные критерии из-за отсутствия условий для их применимости, то работа носит не только методический характер, но и представляет определенный теоретический интерес.

В частности, следует установить, насколько состояние невесомости влияет на опорно-двигательные функции и как это влияние проявляется в показаниях датчика давления. Для этого надо выяснить, насколько меняется паттерн давления на опору при движениях по дорожке с разными скоростями во время

полета, а также насколько заметны изменения состояний до и после полета. Также следует определить, насколько паттерн давления устойчив и существует ли зависимость паттерна от продолжительности тренировки.

Паттерн представляет собой временной профиль импульса давления за промежуток отталкивания от опоры. Эталоном или средним паттерном будем называть усредненный по количеству шагов временной профиль импульса давления в течение одного отталкивания для данного режима движения. Метод исследования нестационарности применительно к данному эксперименту состоит в следующем. Изучается распределение отклонений текущего профиля давления от эталона для каждого режима движения. Мерой изменения паттерна, полученного в различных тестах, служит расстояние между ним и эталоном в метрике L1. Изучается временной ряд остатков, полученных после вычитания эталона из показаний датчика, на стационарность. Исследуется уровень стационарности в зависимости от типа тренировки – до полета, во время полета, после полета.

Частота показаний датчика приближенно равна 100 данным в секунду, продолжительность тренировки составляет около 200 тыс. отсчетов, т.е. примерно 40 мин.

Рассматриваются данные, полученные в процессе тренировки в земных условиях до полета, затем в результате нескольких тренировок во время полета (так называемые полетные сессии), а также на тренировке после полета.

2. Анализ устойчивости нормировки паттерна

Чтобы унифицировать сравнение паттернов, кривая давления за один импульс отталкивания нормируется на площадь под кривой, т.е. на интегральный перенос импульса через стопу за время отталкивания. Рассмотрим нормированную на единицу величину суммарного давления $z_k(n)$ на временном отсчете n в течение квазипериода длительностью τ_k при движении в режиме k:

$$z_k(n) = \frac{r_k(n)}{p_k}, \quad p_k = \sum_{n=1}^{\tau_k} r_k(n), \tag{1}$$

здесь $r_k(n)$ – показания датчика в режиме k на временном отсчете n.

Выяснилось, что длительности τ_k квазипериодов величины давления в разных режимах (т.е. при разных скоростях движения) различны. А именно, средние значения квазипериодов составили при медленной ходьбе $\tau_1 = 65$, при быстрой $\tau_2 = 50$, а при беге $\tau_3 = 35$. В силу квазипериодичности удобно рассматривать текущий паттерн отталкивания, указывая соответствующий номер s шага:

$$x_k(n,s) = z_k\left(n + (s-1)\tau_k\right). \tag{2}$$

В формуле (2) n изменяется от 1 до τ_k при движении в режиме k.

Примеры ненормированных профилей давления в разных режимах показаны на рис. 1 – 9.

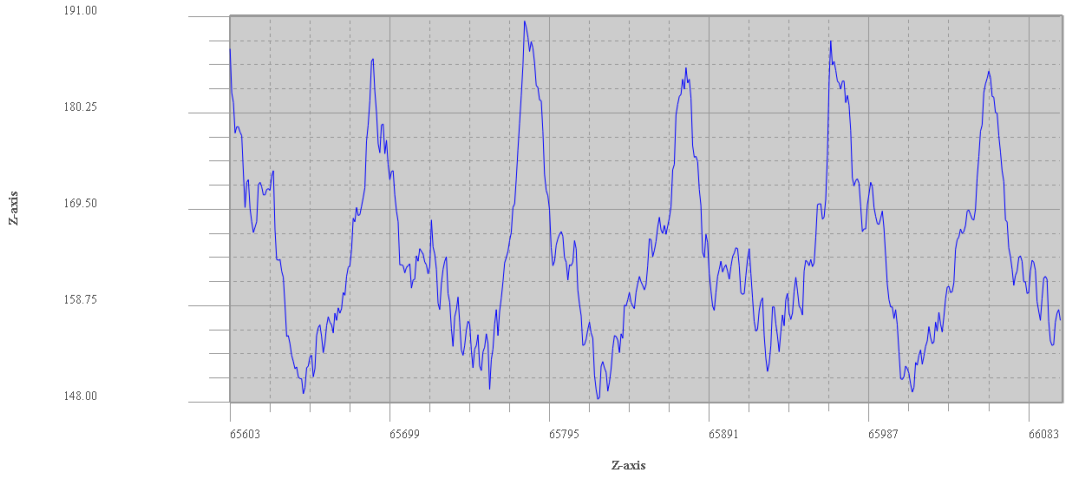

Рис. 1 – Профили давления в режиме 1 до полета

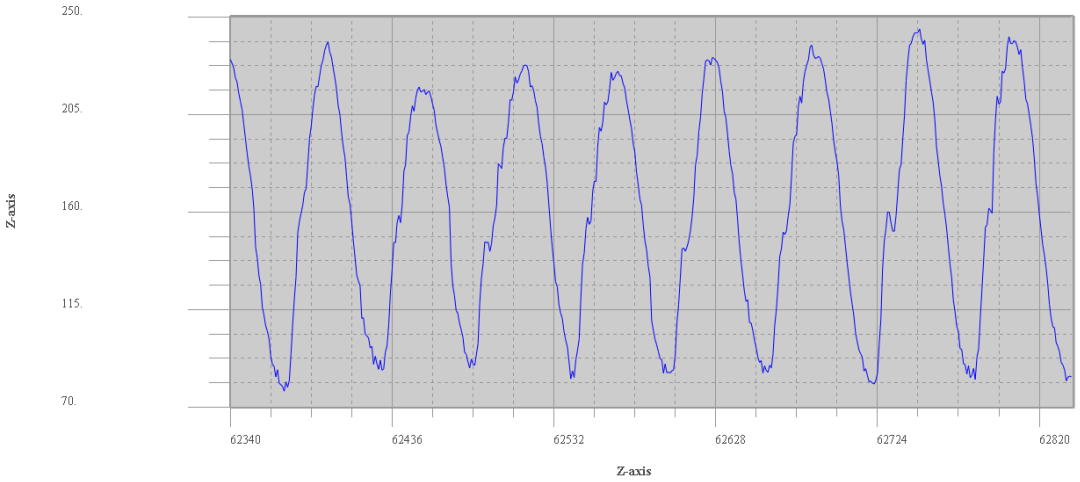

Рис. 2 – Профили давления в режиме 2 до полета

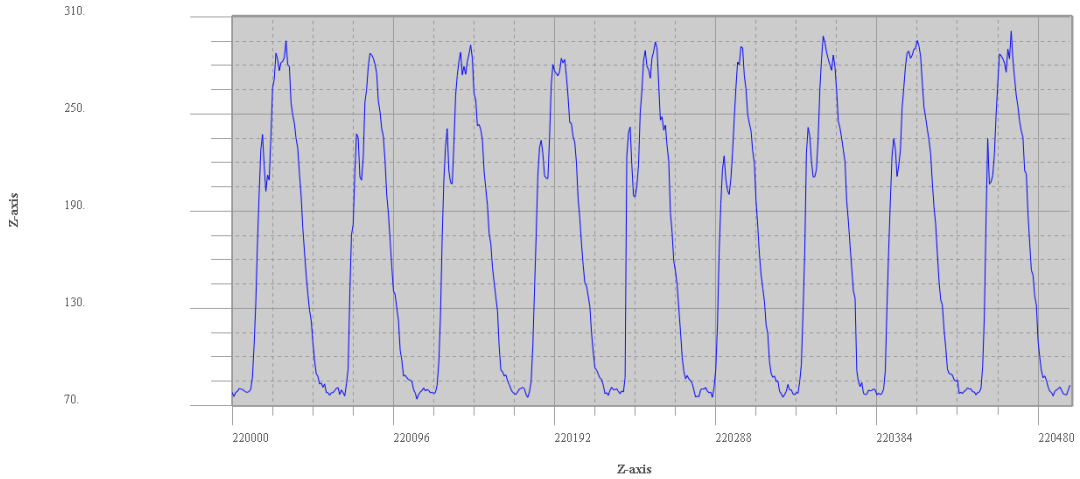

Рис. 3 (а) – Профили давления в режиме 3 до полета, скорость 10 км/ч

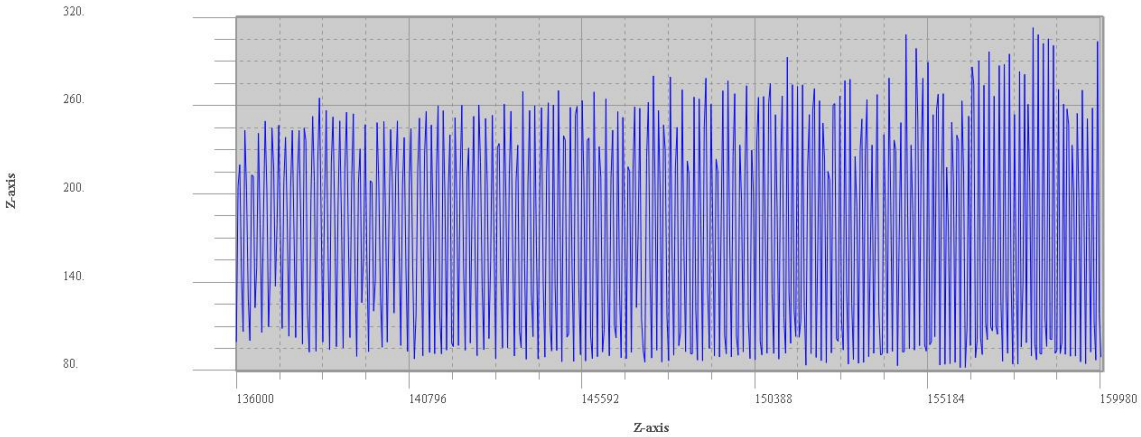

Рис. 3 (б) – Профили давления в режиме 3 до полета, возрастание скорости от 5 до 15 км/ч

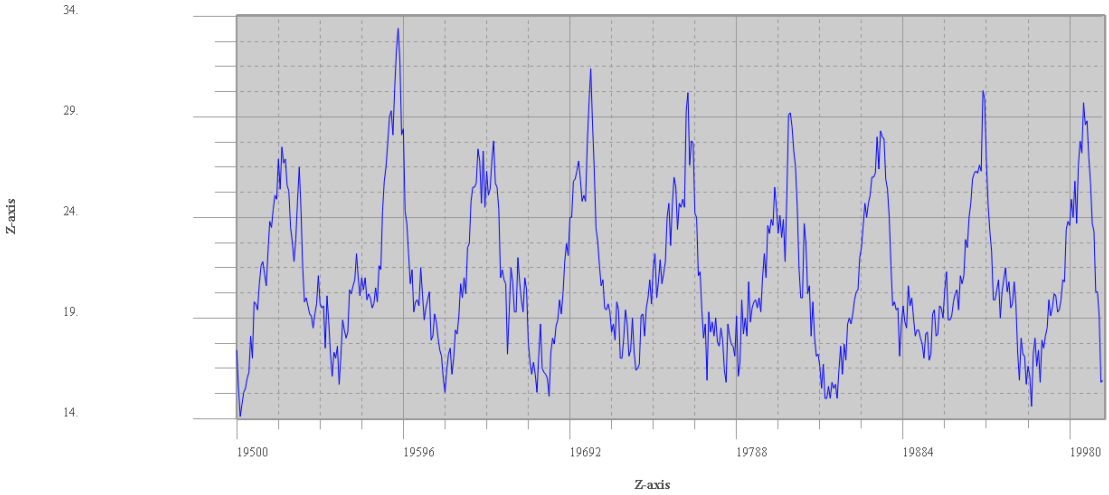

Рис. 4 – Профили давления в режиме 1 в полете

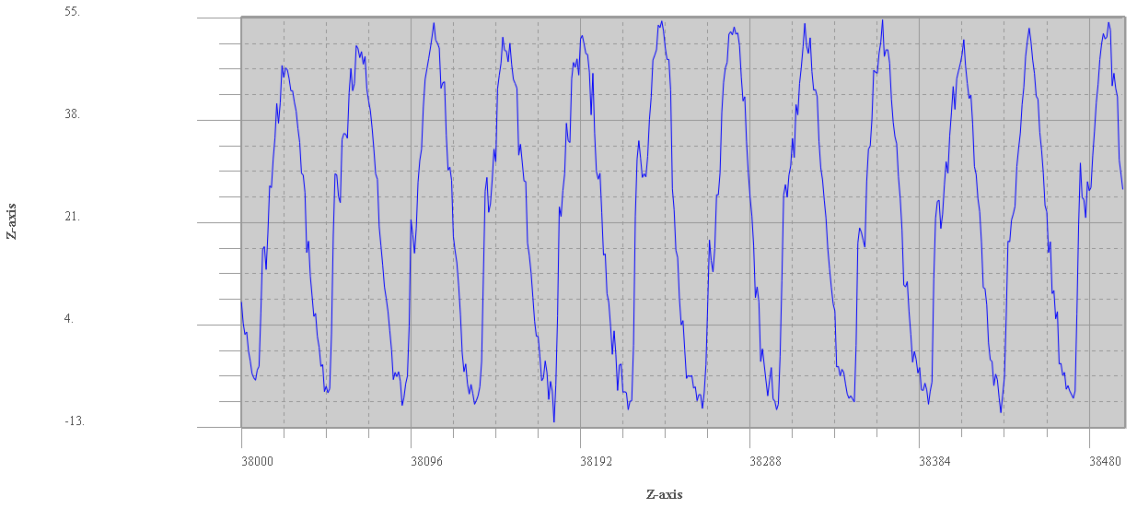

Рис. 5 – Профили давления в режиме 2 в полете

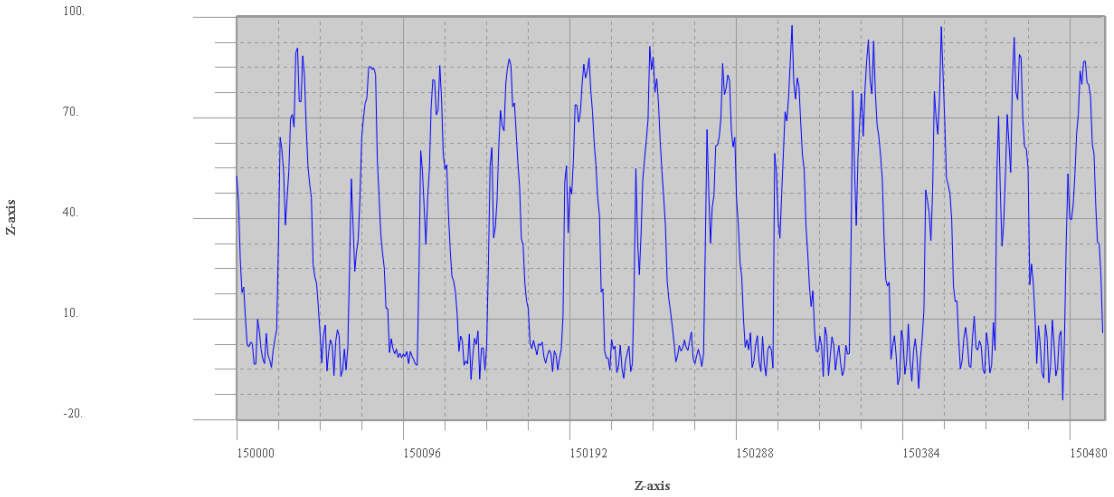

Рис. 6 – Профили давления в режиме 3 в полете, скорость 10 км/ч

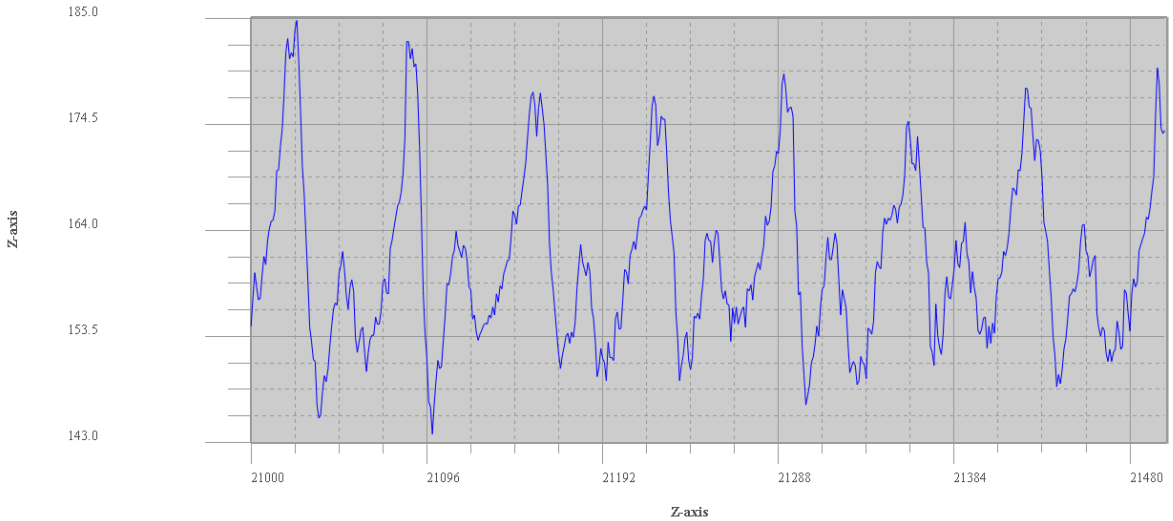

Рис. 7 – Профили давления в режиме 1 после полета

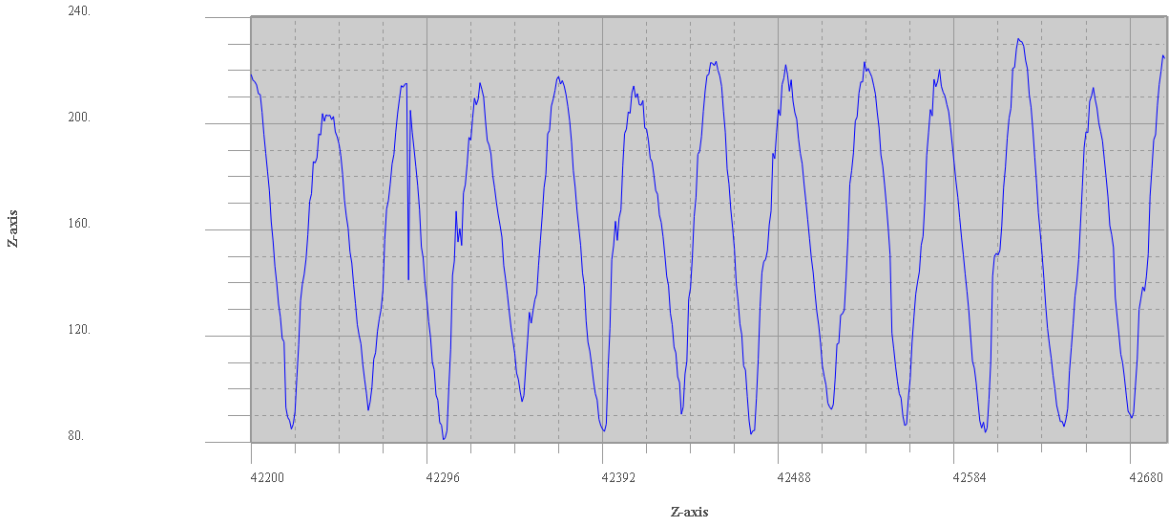

Рис. 8 – Профили давления в режиме 2 после полета

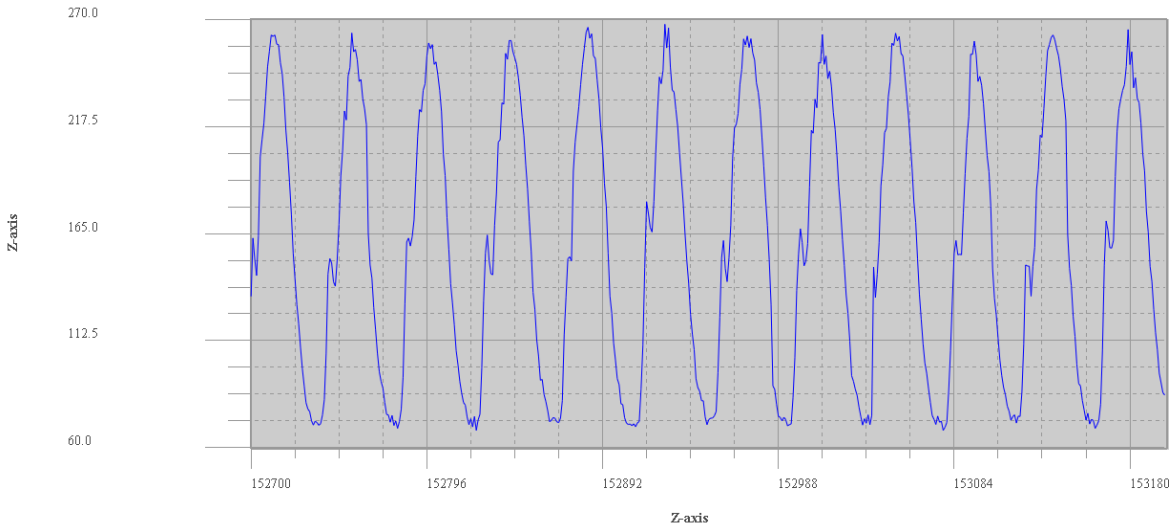

Рис. 9 – Профили давления в режиме 3 после полета, скорость 10 км/ч

Один из индикаторов устойчивости движения – относительное среднеквадратичное отклонение нормировочного множителя p_k из (1) по данным о профилях шагов за тренировку.

Введем обозначение для нормировочного множителя на шаге s:

$$p_k(s) = \sum_{n=1}^{\tau_k} r_k\left(n + (s-1)\tau_k\right). \qquad (3)$$

Введем также среднее значение и относительное среднеквадратичное отклонение нормировки паттерна:

$$P_k = \frac{1}{S}\sum_s p_k(s), \quad \sigma_{k,p} = \sqrt{\frac{1}{S}\sum_s \left(p_k(s) - P_k\right)^2}, \quad \delta_{k,p} = \frac{\sigma_{k,p}}{P_k}, \qquad (4)$$

где S есть полное число шагов в режиме k за тренировку.

Результаты расчетов по формулам (4) сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Статистические свойства нормировки паттернов до полета

Режим движения k	Количество отсчетов τ_k в паттерне	Относительное отклонение $\delta_{k,p}$
«1»	65	0,005
«2»	50	0,009
«3»	35	0,038

Таким образом, относительная вариация давления на опору в режиме ходьбы на тренировке до полета не превосходит 1 %, а в режиме бега – 4 %. При этом относительное отклонение нормировки возрастает с увеличением

скорости движения дорожки, хотя визуально профили давления кажутся при таком сравнении более стабильными.

Результаты аналогичных вычислений для тренировок в полетных сессиях приведены в таблицах 2, 3 и 4.

Таблица 2

Статистические свойства нормировки паттернов в первой полетной сессии

Режим движения k	Количество отсчетов τ_k в паттерне	Относительное отклонение $\delta_{k,p}$
«1»	55	0,017
«2»	40	0,015
«3»	40	0,065

Таблица 3

Статистические свойства нормировки паттернов во второй полетной сессии

Режим движения k	Количество отсчетов τ_k в паттерне	Относительное отклонение $\delta_{k,p}$
«1»	55	0,019
«2»	40	0,025
«3»	40	0,083

Таблица 4

Статистические свойства нормировки паттернов в третьей полетной сессии

Режим движения k	Количество отсчетов τ_k в паттерне	Относительное отклонение $\delta_{k,p}$
«1»	80	0,022
«2»	55	0,045
«3»	45	0,114

Из сравнения таблиц 1-4 следует, что в полете разброс суммарной передачи импульса давления на опору во всех режимах движения монотонно возрастает, то есть растет пропорционально времени пребывания человека в космосе. Это может трактоваться как постепенная потеря координации движений. Однако следует учесть, что во время полета нет возможности

проконтролировать единообразие условий проведения тренировок, в связи с чем выводы можно сделать только ориентировочные.

В таблице 5 приведены результаты расчетов статистики (4) по данным после полета.

Таблица 5

Статистические свойства нормировки паттернов после полета

Режим движения k	Количество отсчетов τ_k в паттерне	Относительное отклонение $\delta_{k,p}$
«1»	75	0,007
«2»	40	0,016
«3»	40	0,048

Можно считать, что устойчивость интеграла давления на опору после полета восстанавливается для всех режимов движения с гистерезисом порядка 30 %. На рис. 10 для примера приведена динамика параметра $\delta_{1,p}$.

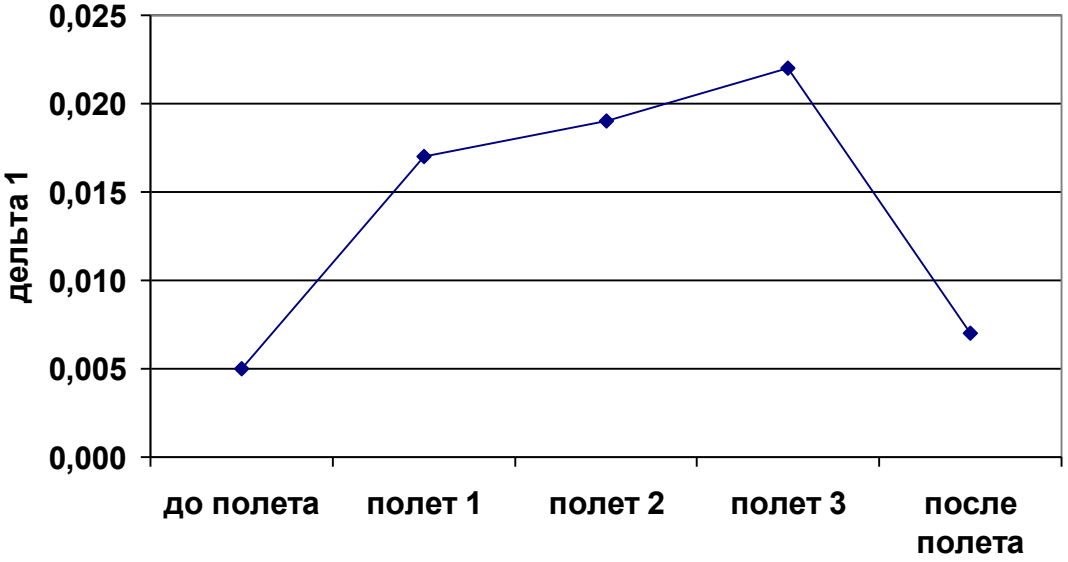

Рис. 10 – Динамика относительного среднеквадратичного отклонения нормировки паттерна движения для режима 1

Поскольку отмеченный гистерезис наблюдался для разных космонавтов, то будем говорить о нем как о наблюдаемом эффекте, а не как о приблизительном равенстве данного параметра. Впрочем, возможно, что этот эффект следует связать с изменением массы космонавта за время полета, что требует отдельного исследования.

3. Анализ устойчивости формы паттерна

Устойчивость нормированного паттерна движения характеризуется отклонением текущего профиля давления от формы эталонного паттерна. Эталон представляет собой средний профиль давления за одно отталкивание при движении в заданном режиме. В обозначениях (2) эталон $X_k(n)$ определяется по формуле

$$X_k(n) = \frac{1}{S}\sum_s x_k(n,s), \tag{5}$$

где S есть полное число шагов в режиме k за тренировку.

Усредненные по тренировке нормированные паттерны $X_k(n)$ для каждого режима в состоянии до полета представлены на рис. 11 – 13. Отметим, что с возрастанием скорости движения максимум давления на опору также возрастает приблизительно по линейной зависимости от скорости.

Рис. 11 – Паттерн суммарного нормированного давления в режиме 1 до полета

Рис. 12 – Паттерн суммарного нормированного давления в режиме 2 до полета

Рис. 13 – Паттерн суммарного давления в режиме 3 до полета, скорость 10 км/ч

Рассмотрим отклонение профиля отдельного шага от эталонного паттерна в норме L1:

$$\delta_k(s) = \sum_{n=1}^{\tau_k} \left| x_k(n,s) - X_k(n) \right| . \qquad (6)$$

Распределение этих расстояний характеризует устойчивость формы паттерна движения. Интерес представляет размах отклонения или носитель распределения отклонений (6). Также индикаторами устойчивости являются среднее отклонение Δ_k и дисперсия отклонений σ_Δ^2, где

$$\Delta_k = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^{S} \delta_k(s) . \qquad (7)$$

Результаты анализа статистик (6), (7) до полета приведены в таблице 6.

Таблица 6

Статистические свойства формы паттернов движения до полета

Режим движения k	Носитель распределения $\delta_k(s)$	Среднее значение Δ_k	Среднеквадратичное отклонение σ_Δ
«1»	$0{,}021 \div 0{,}053$	0,033	0,010
«2»	$0{,}025 \div 0{,}092$	0,048	0,016
«3»	$0{,}035 \div 0{,}151$	0,083	0,032

Следовательно, с увеличением скорости движения форма паттерна давления имеет увеличивающуюся вариацию.

Полетные сессии приводят к увеличению статистической неопределенности формы паттерна (см. таблицы 7-9), но в течение полета это увеличение незначительно.

Таблица 7

Статистические свойства формы паттернов движения в первой полетной сессии

Режим движения k	Носитель распределения $\delta_k(s)$	Среднее значение Δ_k	Среднеквадратичное отклонение σ_Δ
«1»	$0{,}031 \div 0{,}104$	0,061	0,020
«2»	$0{,}041 \div 0{,}178$	0,096	0,032
«3»	$0{,}048 \div 0{,}257$	0,175	0,064

Таблица 8

Статистические свойства формы паттернов движения во второй полетной сессии

Режим движения k	Носитель распределения $\delta_k(s)$	Среднее значение Δ_k	Среднеквадратичное отклонение σ_Δ
«1»	$0{,}035 \div 0{,}110$	0,065	0,022
«2»	$0{,}045 \div 0{,}184$	0,104	0,035
«3»	$0{,}050 \div 0{,}262$	0,185	0,068

Таблица 9

Статистические свойства формы паттернов движения в третьей полетной сессии

Режим движения k	Носитель распределения $\delta_k(s)$	Среднее значение Δ_k	Среднеквадратичное отклонение σ_Δ
«1»	$0{,}040 \div 0{,}115$	0,070	0,025
«2»	$0{,}050 \div 0{,}190$	0,110	0,040
«3»	$0{,}053 \div 0{,}266$	0,190	0,070

Среднее значение отклонения формы паттерна в норме L1, как и корень из дисперсии отклонения, приблизительно сохраняют пропорциональную зависимость от режимов движения, т.е. от скорости, как и в сессии до полета: режим 2 в терминах указанных параметров отличается от режима 1 примерно в 1,5 раза в большую сторону, а режим 3 отличается от режима 1 в 3 раза.

Сессия после полета характеризуется восстановлением параметров до полета с гистерезисом порядка 30 %, как показано в таблице 10.

Таблица 10

Статистические свойства формы паттернов движения после полета

Режим движения k	Носитель распределения $\delta_k(s)$	Среднее значение Δ_k	Среднеквадратичное отклонение σ_Δ
«1»	$0{,}026 \div 0{,}066$	0,041	0,013
«2»	$0{,}032 \div 0{,}107$	0,055	0,021
«3»	$0{,}041 \div 0{,}168$	0,104	0,042

Эти результаты качественно согласуются с выводом п. 1.1.1 о снижении устойчивости локомоторных функций во время полета.

4. Анализ нестационарности ряда отклонений профиля давления от паттерна

Чувствительным методом анализа состояния функционирования сложной динамической системы и выявления разладки является непараметрический анализ нестационарности функции распределения параметров системы в норме непрерывных функций [1]. В частности, индикатором разладки является изменение уровня нестационарности временного ряда на некоторых длинах выборки.

Введем теперь статистику согласованного уровня стационарности (СУС) для временного ряда, следуя определениям [1]. Смысл статистики СУС состоит в том, что для выборок определенной длины из стационарного или из нестационарного ряда СУС равен уровню значимости, на котором две выборки признаются взятыми из одного распределения.

Как известно [2], решение задачи о принадлежности двух выборочных функций распределения (ВФР) одной генеральной совокупности использует непараметрический критерий Колмогорова-Смирнова. Строится статистика

$$S_N = \sup_x \left| F_{1,N}(x) - F_{2,N}(x) \right|, \tag{8}$$

для которой справедлива асимптотика

$$\lim_{N\to\infty} P\left\{ 0 < \sqrt{\frac{N}{2}}\, S_N < z \right\} = K(z), \tag{9}$$

где $K(z)$ есть табулированная функция Колмогорова, а N есть длина выборки. Здесь $F_N(x)$ есть ВФР случайной величины ξ, значения x которой наблюдаются в виде последовательности событий во временном окне длины N.

На практике при использовании формулы (9) уровень значимости α данного критерия задается априори. Обозначим $\varepsilon_N(\alpha)$ величину α-квантиля для вероятности превышения заданного уровня z: $P(S_N \geq z) = \alpha$. Критическое множество для этого критерия определяется условием $S_N \geq \varepsilon_N(\alpha)$. Для этой величины имеет место асимптотическое представление [3]:

$$\varepsilon_N(\alpha) = \sqrt{\frac{z}{2N}} - \frac{1}{6N} + o(1/N), \tag{10}$$

где z есть корень уравнения

$$1 - K\left(\sqrt{\frac{z}{2}}\right) = \alpha. \tag{11}$$

Если имеется всего две выборки, то уровень значимости α задается в соответствии с практическими требованиями. Если же статистический эксперимент позволяет исследовать временной ряд с большим количеством выборок данной длины, то в качестве уровня значимости удобно брать стационарную точку критерия (9). Именно, пусть ε есть расстояние между выборками в норме *C*, определяемое формулой (8). Рассмотрим стационарную точку уровня значимости (т.е. согласованный уровень стационарности, СУС):

$$Q(\varepsilon) \equiv 1 - K\left(\sqrt{\frac{N}{2}}\varepsilon\right) = \varepsilon. \tag{12}$$

Для стационарных распределений положение стационарной точки $\varepsilon = \varepsilon_0(N)$ как решения уравнения (12) не зависит от вида распределения F. Это решение единственно в силу монотонности функции $K(z)$.

Обозначим через $G_N(\rho)$ эмпирическую функцию распределения расстояний $\rho(N)$ между двумя непересекающимися выборками длины *N*:

$$\rho(N) = \left\| F_{1,N}(x) - F_{2,N}(x) \right\|_C. \tag{13}$$

Численное решение относительно ρ уравнения

$$G_N(\rho) = 1 - \rho \tag{14}$$

дает значение СУС $\rho^*(N)$ как вероятности того, что расстояние между выборками длины *N* больше ρ^*.

Индексом нестационарности называется отношение

$$J(N) = \frac{\rho^*(N)}{\varepsilon_0(N)}. \tag{15}$$

Используем описанную методику для определения уровня нестационарности временного ряда остатков, полученных после вычитания из суммарных показаний датчиков среднего профиля давления за один квазипериод. Именно, рассмотрим последовательности величин

$$y_k(n + (s-1)\tau_k) = x_k(n, s) - X_k(n). \tag{16}$$

Для них индексы нестационарности в соответствии с режимами движения и в зависимости от длины выборки показаны на рис. 14 – 15.

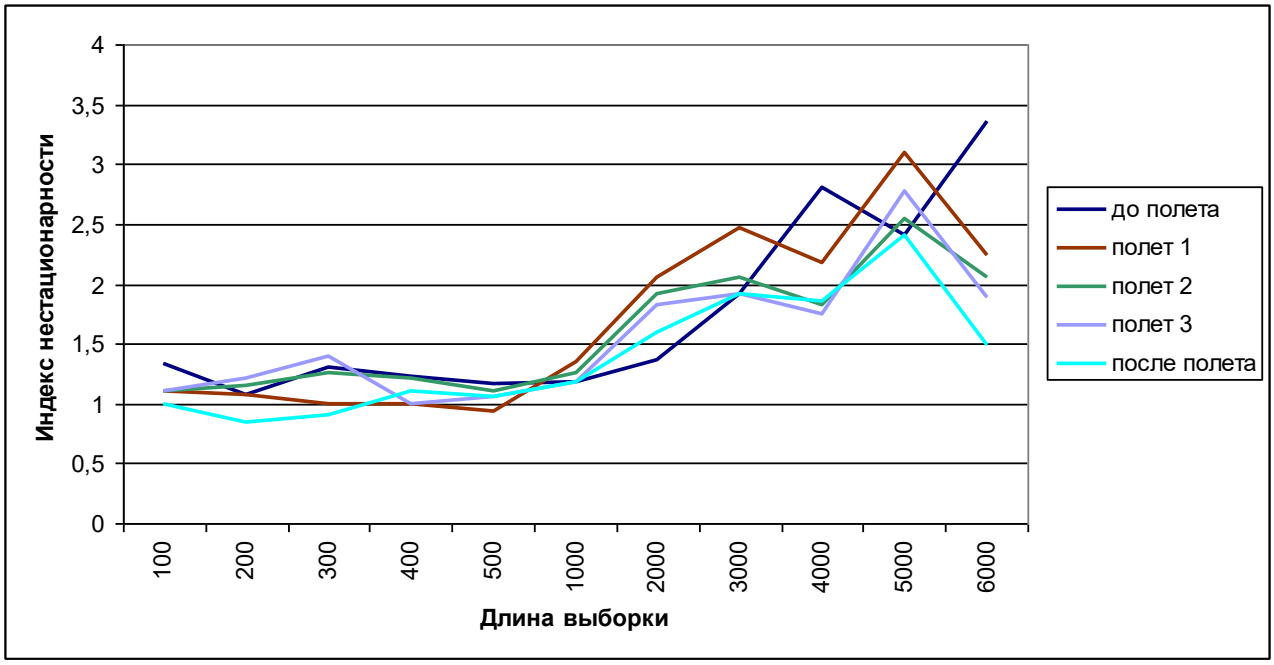

Рис. 14 – Индекс нестационарности ряда остатков
при движении в режиме 1

Из рис. 14 применительно к режиму 1 (медленная ходьба) следует вывод о том, что невесомость по-разному влияет на изменение походки в зависимости от времени движения. Так, из графика до полета видно, что нормальное состояние ходьбы слабо нестационарно на малых и средних длинах (примерно до 200 шагов), после чего начинается увеличение нестационарности. Это связано с тем, что после изменения режима 1 на режим 2 возврат к режиму 1 приводит к изменению локомоции. В целом эта тенденция сохраняется с увеличением длины выборки. Если сравнить эту тенденцию с графиком индекса нестационарности в первой полетной сессии, то можно увидеть, что движение на малых длинах (до 10 шагов) стационарно, но такое состояние не поддерживается долго даже в отсутствие смены режима движения, и индекс нестационарности возрастает быстрее, чем в земных условиях. В дальнейшем наступает адаптация к невесомости, проявляющаяся в том, что уровень нестационарности снижается. Нетривиальным эффектом является дальнейшее снижение индекса нестационарности по возвращении.

Из рис. 15 следует, что быстрая ходьба имеет ряд отличий. Во-первых, тренировка до полета показывает в этом режиме более высокий уровень нестационарности, чем при медленной ходьбе. Во-вторых, невесомость не приводит сначала к эффекту стабилизации, как это происходило при медленной ходьбе. Однако в последующем происходит адаптация именно к быстрому движению, так что быстрая ходьба начинает иметь более устойчивый характер, чем медленная. По возвращении эта устойчивость даже усиливается.

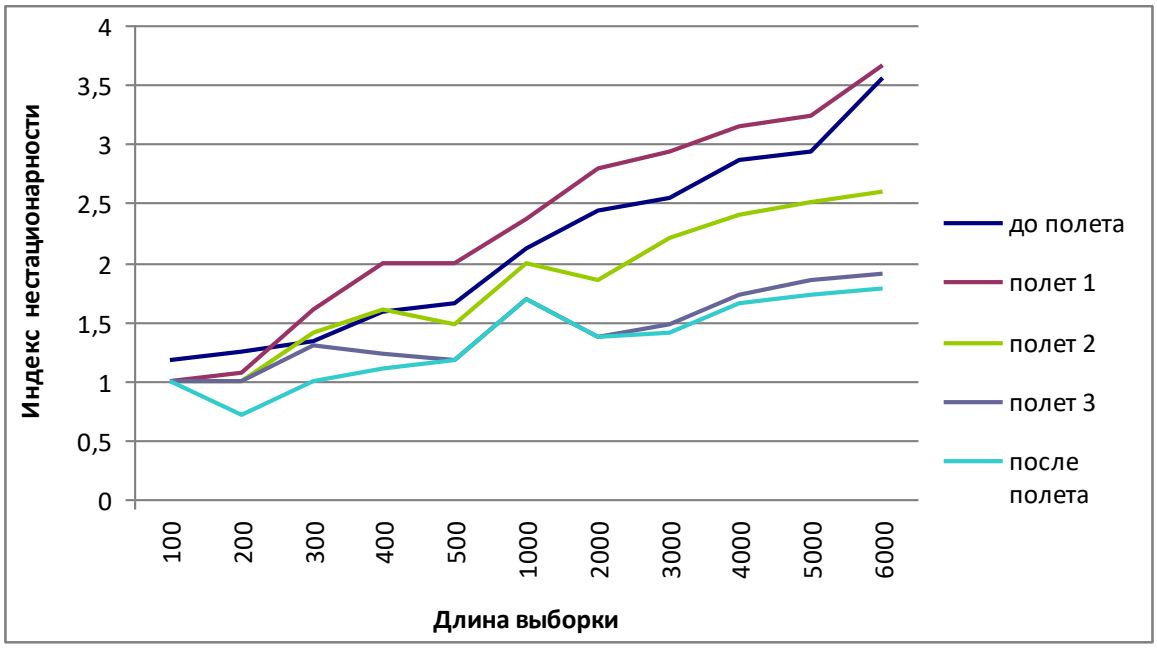

Рис. 15 – Индекс нестационарности ряда остатков при движении в режиме 2

5. Оценка влияния неточности реализации протокола

Итак, основными индикаторами устойчивости локомоторных функций в работе являются относительное среднеквадратичное отклонение суммарного давления на опору в течение одного шага и среднее суммарное отклонение нормированного профиля давления в течение одного шага от среднего нормированного профиля.

При этом возникает вопрос о точности, с которой проводятся измерения исходных величин – в частности, длины шага, а также о зависимости длины шага от скорости движения дорожки. Если анализируется устойчивость локомоций в определенном режиме движения – например, при ходьбе со скоростью 3 км/ч, то следует выяснить, насколько изменяется паттерн давления при малой вариации скорости дорожки. Сравнивать для этой цели между собой последовательные профили давления и текущие скорости движения дорожки было бы неверным, поскольку профиль давления определяется как скоростью дорожки, так и координацией движений собственно испытуемого, и по отдельному измерению эти вклады не могут быть отфильтрованы. Тогда в качестве предварительной оценки предлагается следующее.

Для данного космонавта рассмотрим зависимость средней продолжительности времени отталкивания $\bar{\tau}$ от скорости движения v дорожки в данном конкретном эксперименте. Построим линейную аппроксимацию этой зависимости. Например, при сравнении двух режимов ходьбы со средними скоростями 3 км/ч и 6 км/ч обнаружилось, что средняя длина шага в первом случае составила 65 временных отсчетов длительностью приблизительно 0,01 с, а во втором – 45 отчетов. Тогда можно считать, что в средних величинах при ходьбе отдельные отклонения от паттерна давления взаимно компенсировались, так что изменения длины шага определяются главным

образом скоростью движения дорожки. Отсюда получаем приближенную формулу связи средней длины шага и средней скорости движения дорожки:

$$\bar{\tau} = 80 - 5\bar{v}\,, \tag{17}$$

где скорость выражена в км/ч, а длина шага – в десятках миллисекунд.

Заметим теперь, что дорожка движется в режиме 1 (или 2 и 3) не с постоянной скоростью. Возникает вопрос: насколько существенным является для анализа устойчивости локомоций факт неустойчивости реализации протокола движения? В частности, при движении в режиме 1 со средней скоростью 3,00 км/ч среднеквадратичное отклонение скорости составило $\sigma_v = 0{,}12$, так что относительное среднеквадратичное отклонение скорости (т.е. точность реализации протокола движения) составила

$$\delta_v = \frac{\sigma_v}{\bar{v}} = 0{,}04\,. \tag{18}$$

Если предположить теперь, что формула (17) приближенно описывает эффект влияния скорости дорожки на длину шага, т.е. верна (при условии сохранения локомоторной функции) и для отдельных шагов, то относительная вариация длины шага вследствие изменения скорости движения будет равна

$$\delta_\tau = \frac{\sigma_\tau}{\bar{\tau}} = \frac{5\sigma_v}{80 - 5\bar{v}} = \frac{\sigma_v}{\bar{v}} \frac{1}{\frac{16}{\bar{v}} - 1} \approx 0{,}25\delta_v\,. \tag{19}$$

С этой вариацией связано текущее отклонение нормированного профиля давления от среднего паттерна. Если аппроксимировать нормированный профиль давления равнобедренным треугольником с единичной площадью, то легко проверить, что интегральная норма разности профилей для двух треугольников, длины оснований которых отличаются на σ_τ, равна δ_τ.

Если взять теперь из таблицы 6 среднее значение отклонения профиля отдельного шага от паттерна для режима 1, равное $\Delta_1 = 0{,}033$, и сравнить его с величиной δ_τ из формулы (19), равной для этого примера, как следует из (18), величине $\delta_\tau = 0{,}01$, то становится ясно, что наблюдаемая вариация профиля паттерна всего лишь примерно на 30 % определяется неустойчивостью режима движения дорожки, а остальная вариация порождена неустойчивостью собственно локомоторных функций испытуемого. Следовательно, выявление изменения локомоций статистически значимо.

6. Заключение

В работе построены паттерны опорных реакций по показаниям датчика давления по трем режимам движения: до полета, во время полета и после полета. Выяснено, что паттерны статистически устойчивы, имеют хорошую идентификационную чувствительность к режимам движения, а также заметно различаются по своим статистическим характеристикам в указанных экспериментах.

Построены три типа индикаторов состояния космонавта применительно к анализу его локомоторных функций. Первый тип – это уровень погрешности интегральных характеристик собственно показаний датчиков. В состояниях до полета, во время полета и после полета уровни относительного среднеквадратичного отклонения интеграла передаваемого импульса за один шаг значимо различаются. Второй тип – оценка изменения временной формы импульса давления за один шаг на протяжении тренировки. Индикатором является отклонение от паттерна в норме суммируемых функций. Третий тип – индекс нестационарности временного ряда отклонений, показывающий различия адаптационных возможностей организма в разных режимах движения.

По результатам эксперимента выяснилось, что индикаторы первых двух типов монотонно возрастают за время длительного космического полета для всех режимов движения. Это означает, что наблюдается повышение вариативности и уменьшается стандартность шага. С другой стороны, наблюдается снижение индекса нестационарности, то есть изменение вариативности становится более стандартно. Это свидетельствует о формировании нового двигательного навыка – выполнения локомоций на неустойчивой опоре. Изменения в системах вегетативного обеспечения мышечной деятельности в ходе полета свидетельствуют о снижении физиологической стоимости работы. Формируются соматический и вегетативный компоненты двигательного навыка. После завершения длительного космического полета отмечено возвращение к исходной моторной программе, причем приобретенная более устойчивая вариативность шага сохраняется по возвращении на Землю.

Список источников

1. Королюк В.С., Портенко Н.И., Скороход А.В., Турбин А.Ф. Справочник по теории вероятностей и математической статистике. – М.: Наука, 1985. – 640 с.
2. Орлов Ю.Н. Кинетические методы исследования нестационарных временных рядов. – М.: МФТИ, 2014. – 276 с.
3. Большев Л.Н. Асимптотически пирсоновские преобразования // Теория вероятностей и ее применения, 1963. – Т. 8. – С. 129-155.