



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

Препринты ИПМ • Препринт № 38 за 2020 г.



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

**Ивченко А.Ю., Орлов Ю.Н.,  
Фомина Е.В.**

Индикаторы устойчивости  
локомоторных функций  
космонавта

**Рекомендуемая форма библиографической ссылки:** Ивченко А.Ю., Орлов Ю.Н., Фомина Е.В. Индикаторы устойчивости локомоторных функций космонавта // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2020. № 38. 24 с. <http://doi.org/10.20948/prepr-2020-38>  
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2020-38>

**Ордена Ленина  
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ  
имени М.В.Келдыша  
Российской академии наук**

**А.Ю. Ивченко, Ю.Н. Орлов, Е.В. Фомина**

**Индикаторы устойчивости  
локомоторных функций космонавта**

**Москва — 2020**

**Ивченко А.Ю., Орлов Ю.Н., Фомина Е.В.**

### Индикаторы устойчивости локомоторных функций космонавта

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. Для анализа локомоций вводятся семь индикаторов. Это индекс нестационарности длин шагов и ряда отклонений профиля давления от паттерна шага, индекс независимости полушагов и их корреляция, коэффициент устойчивости средних значений распределений длин шагов, а также дрейф и диффузия в модельном уравнении Фоккера-Планка относительно распределения профиля давления. Проведен анализ тренировок космонавта до полета и после полета.

**Ключевые слова:** анализ биометрических данных, локомоторные функции, космонавт

**Ivchenko A.Yu., Orlov Yu.N., Fomina E.V.**

### Indicators of stability of locomotor functions of cosmonauts

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. Several types of indicators are constructed. The first type of indicators shows the stability level of the integral characteristics of the pressure profiles. 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 functions, cosmonaut

Работа выполнена в рамках базовой темы РАН 63.1

### Содержание

1. Введение .....	3
2. Распределение шагов по длине .....	6
3. Анализ ряда интегральных давлений за один шаг .....	11
4. Распределение отклонений профиля давления от паттерна .....	13
4. Модель эволюции распределения отклонений .....	17
5. Сравнение тренировок до полета и после полета .....	19
6. Заключение.....	23
Список источников.....	24

## 1. Введение

В настоящей работе продолжается начатое в [1] исследование нестационарной статистики биометрических данных, получаемых в процессе тестирования состояния космонавтов на беговой дорожке.

Рассматриваются показания датчика давления на опору при движении по ней человека. Целью является анализ изменения локомоторных функций во время космического полета по сравнению с земными условиями.

В исследовании использован локомоторный 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  $0,01 \text{ м/с}^2$  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. В настоящей работе, носящей в основном методический характер, мы рассмотрим только один (первый) режим движения.

Поскольку идентификация 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 требуется разработать специальную систему индикаторов. В работе [1] анализировалась устойчивость формы паттерна давления на опору в течение одного шага, а ряд отклонений профиля давления от паттерна исследовался на стационарность. В настоящей работе вводятся индикаторы различных типов. Изучаются свойства распределений шагов по длинам и этапам шага и вводится коэффициент взаимовлияния этапов. Изучается ряд интегральных давлений на опору во время движения в пределах одного шага и в пределах среднего шага. Также уточняется понятие паттерна профиля шага. Каждый из получающихся рядов тестируется на стационарность.

Эталон или паттерном движения будем называть усредненный по количеству шагов временной профиль импульса давления в течение одного шага 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 изменение уровня стационарности при сравнении тренировок до полета и после полета.

По временному ряду показаний датчиков требуется оценить степень физической готовности организма к нагрузкам определенного вида. Частота показаний датчиков приблизительно постоянна и составляет 100 1/с. Будем

обозначать  $X(n)$  величину давления, отвечающего  $n$ -му показанию датчика. Типичный профиль давления во время движения показан на рис. 1.

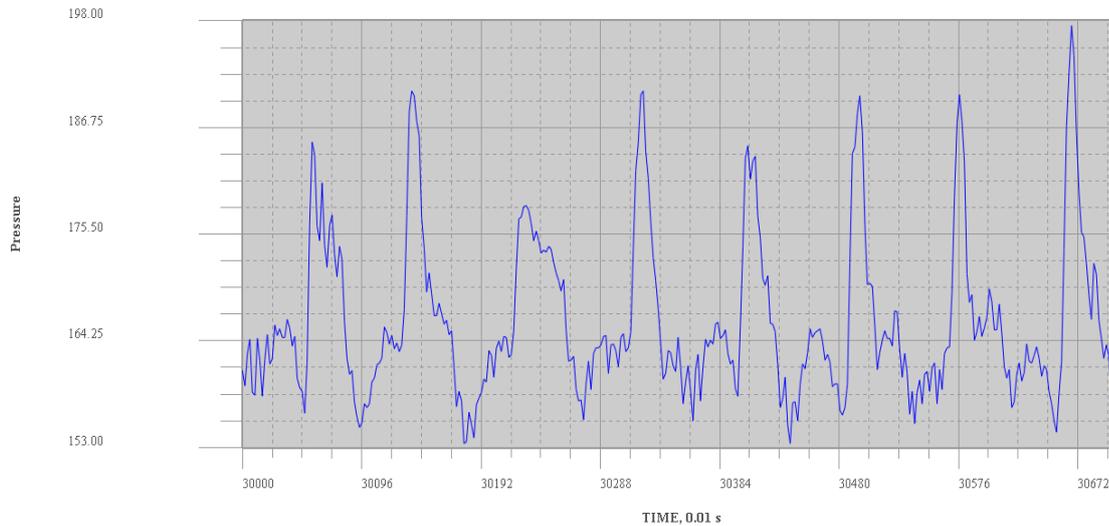


Рис. 1 – Профиль давления при ходьбе со скоростью 3 км/ч

Как видно, профили последовательных шагов отличаются один от другого, но между ними есть определенная схожесть – они квазипериодичны, что позволяет однозначно идентифицировать точки локальных минимумов и максимумов, отделяющих один шаг от другого. Требуется определить, какие различия между профилями могут свидетельствовать об усталости и, как следствие, о нарушении локомоций. Эти данные могут использоваться для оценки влияния нагрузки определенного вида в зависимости от ее длительности.

В данной работе вводятся индикаторы нескольких типов для анализа устойчивости локомоций.

Первый индикатор – согласованный уровень стационарности (СУС) временного ряда на выборках длины  $N$  [2]. Таких временных рядов при анализе локомоций семь: длина шага  $T$ , длина первой половины шага  $\tau$  от максимального давления до минимального (подъем ноги), длина второй половины шага  $\theta$  (опускание ноги), интеграл давления  $P$  в естественном окне шага между двумя максимумами давления, интеграл давления  $S$  в среднем окне шага длины  $T$ , привязанном к максимуму давления, отклонение  $x$  от профиля нормированного паттерна движения, интегральное отклонение  $\delta$  от профиля нормированного паттерна движения в течение одного шага. Для каждого из этих рядов вычисляется СУС в виде следующей статистики.

Вводится эмпирическая функция распределения  $G_N(\rho)$  расстояний  $\rho(N)$  между двумя непересекающимися выборками длины  $N$  с выборочными функциями распределения (ВФР)  $F_N(x)$ :

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

Численное решение относительно  $\rho$  уравнения

$$G_N(\rho) = 1 - \rho \quad (2)$$

дает значение СУС  $\rho^*(N)$  как вероятности того, что расстояние между выборками длины  $N$  больше  $\rho^*$ . Изменение уровня СУС свидетельствует об изменении движения, т.е. о начале разладки в системе.

Второй индикатор – это средние значения статистик: первый и второй моменты распределений длины шагов, интегралов давлений и интегральных отклонений от нормированных паттернов. Вычисление этих индикаторов по выборкам в скользящих окнах покажет наличие или отсутствие тенденции.

Третий индикатор – индекс устойчивости среднего значения, т.е. индикатор вида  $s(t) = M(t)/\sigma(t)$  отношения среднего значения к среднеквадратичному отклонению. Если меняется индекс устойчивости при постоянстве одного из факторов (среднем значении или дисперсии), то это свидетельствует об изменении соответственно либо тенденции, либо устойчивости. Если индекс устойчивости сохраняется неизменным при изменении составляющих его факторов, это свидетельствует о перестройке режима работы системы или о переключении в другое состояние без изменения качества этой работы.

Четвертым индикатором является функция зависимости между начальной и конечной фазами шага. С одной стороны, длина шага как случайная величина есть сумма двух других случайных величин – длины начальной стадии шага и длины конечной стадии:  $T = \tau + \theta$ . Пусть  $f_J(T)$  есть выборочная плотность функции распределения (ВПФР) длины шага по выборке  $J$  шагов,  $g_J(\tau)$  и  $h_J(\theta)$  соответственно ВПФР начальной и конечной длины шага. Если бы ВПФР  $g_J(\tau)$  и  $h_J(\theta)$  были независимы, то теоретическая ВПФР  $\tilde{f}_J(T)$  определялась бы по формуле свертки:

$$\tilde{f}_J(T) = \int g_J(T-t)h_J(t)dt. \quad (3)$$

Сравнение величины (3) с фактически наблюдаемой ВПФР  $f_J(T)$  позволит оценить индекс независимости

$$A_J(T) = \frac{f_J(T)}{\int g_J(T-t)h_J(t)dt} \quad (4)$$

и его изменение с течением времени, если построить этот индекс для выборок в скользящих окнах. Для независимых величин индекс (4) равен единице.

Пятый индикатор – это параметры кинетического уравнения Фоккера-Планка для моделирования эволюции ВПФР отклонений профиля давления от формы паттерна. Это параметры сноса и диффузии применительно к ВПФР. Изменение параметров кинетического уравнения с течением времени покажет направление перестройки стратегии локомоций в процессе движения, а также позволит оценить влияние различных режимов (земные условия, полетная сессия).

Шестой индикатор – это коэффициент корреляции между интегральным давлением за один шаг и длиной шага.

## 2. Распределение шагов по длине

Рассмотрим последовательность моментов минимумов профилей отдельных шагов:  $n_1, n_2, \dots$ . Разность между ними составляет длину шага  $T_j$  в единицах отсчета времени:

$$T_j = n_{j+1} - n_j. \quad (5)$$

Распределение длин шагов при движении по дорожке со средней скоростью 3 км/ч за тренировку до полета представлено на рис. 2.

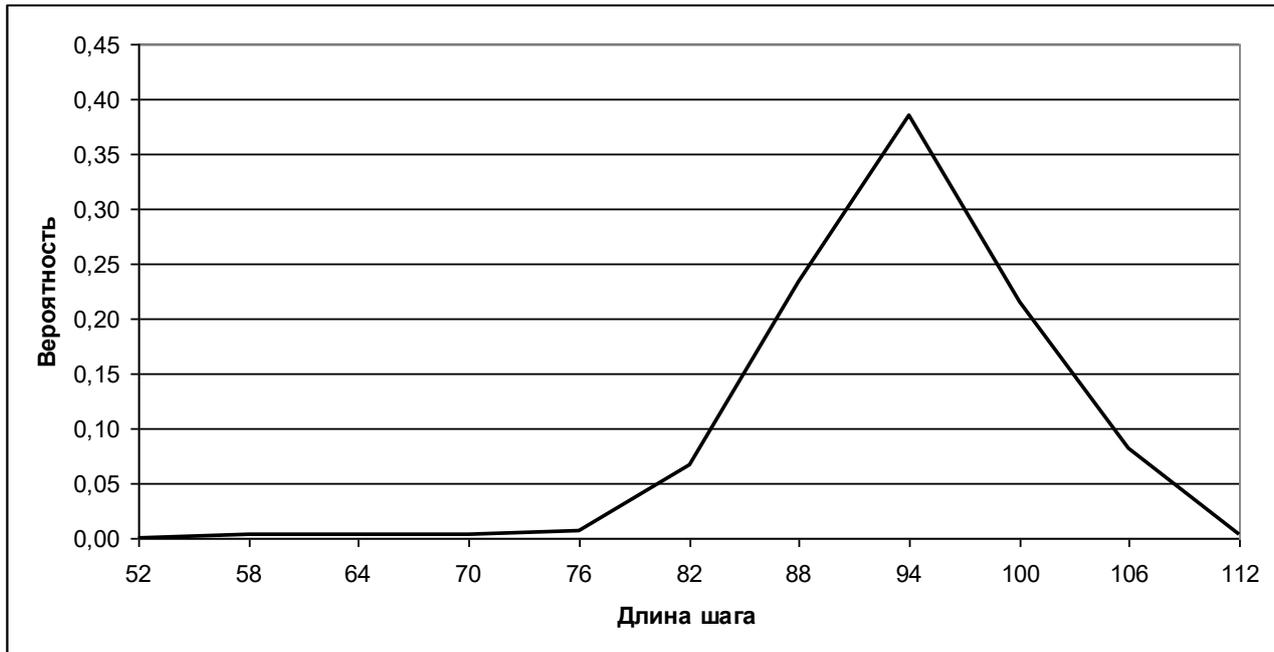


Рис. 2 – Эмпирическое распределение длины шага (в единицах отсчета времени) при ходьбе со скоростью 3 км/ч

Таким образом, за исключением 1 % левого «хвоста» распределение шагов по длине симметрично-треугольное с модой 94, средним значением 91,5 и среднеквадратичным отклонением 6,8. Отметим, что точность расположения моды этого распределения – интервал от 88 до 94.

Рассмотрим также статистику «левых половин» профилей шагов  $\tau_j$  и соответствующую статистику «правых половин»  $\theta_j$ . Для этого введем положения максимумов профилей отдельных шагов  $m_1, m_2, \dots$ . Удобно первым экстремумом профиля считать минимум. Тогда «левая часть» шага (фаза опускания ноги) имеет длину  $\tau_j = m_j - n_j$ , а правая (подъем) имеет длину  $\theta_j = n_{j+1} - m_j$ . Согласно (5), сумма этих длин дает полную длину шага:

$$T_j = \tau_j + \theta_j. \quad (6)$$

Несмотря на симметричность распределения полной длины шага, составляющие ее левая и правая части не симметричны: правая часть, как и следует из ее названия, несколько сдвинута вправо (рис. 3). Параметры этих распределений:  $\bar{\tau} = 43,8$ ;  $\bar{\theta} = 47,6$ ;  $\sigma_\tau = 5,9$ ;  $\sigma_\theta = 5,4$ . Отсюда следует, что фаза

подъема несколько длиннее, чем фаза опускания, и, кроме того, ее дисперсия меньше. Вследствие этого фаза подъема более устойчива, поскольку из сравнения обратных индексов устойчивости средних длин этих полушагов находим, что  $\frac{\sigma_\tau}{\tau} = 0,13 > \frac{\sigma_\theta}{\theta} = 0,11$ .

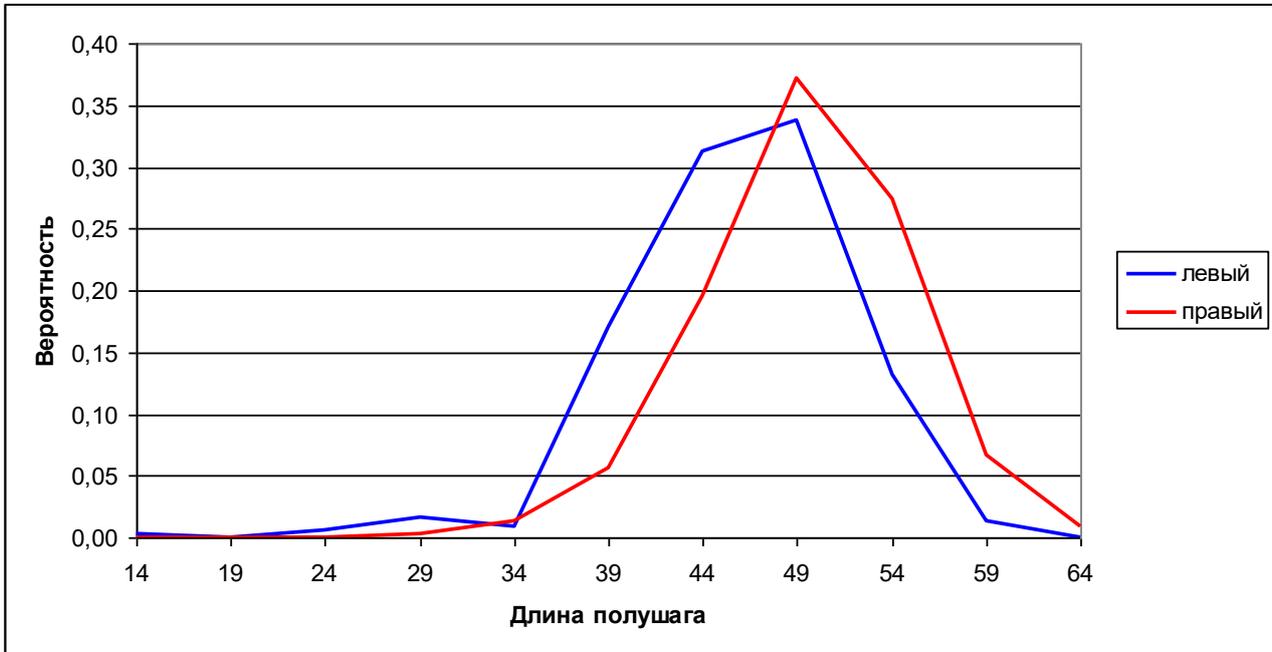


Рис. 3 – Эмпирическое распределение длины полушага (в единицах отсчета времени) при ходьбе со скоростью 3 км/ч

Насколько можно считать фазы движения независимыми? Коэффициент корреляции между левой и правой частями шага равен  $r = -0,28$ , что обычно считается малой величиной. Тем не менее, корреляция значимо отлична от нуля по критерию Стьюдента [3]: гипотеза о равенстве нулю корреляции отклоняется с вероятностью 0,98.

Вычислим для этих распределений более детальную величину – индекс независимости (4). Он показан на рис. 4.

Из рис. 4 следует, что при коротких и длинных шагах зависимость между временем подъема и опускания ноги во время движения существенна. Этапы движения могут приближенно считаться независимыми при длинах шага, равных «средней длине плюс/минус стандартное отклонение», то есть при длинах 84 и 98. Однако в моде распределения (при длине шага от 88 до 94) этот индекс на 20 % больше единицы, что свидетельствует о частичной согласованности этапов движения.

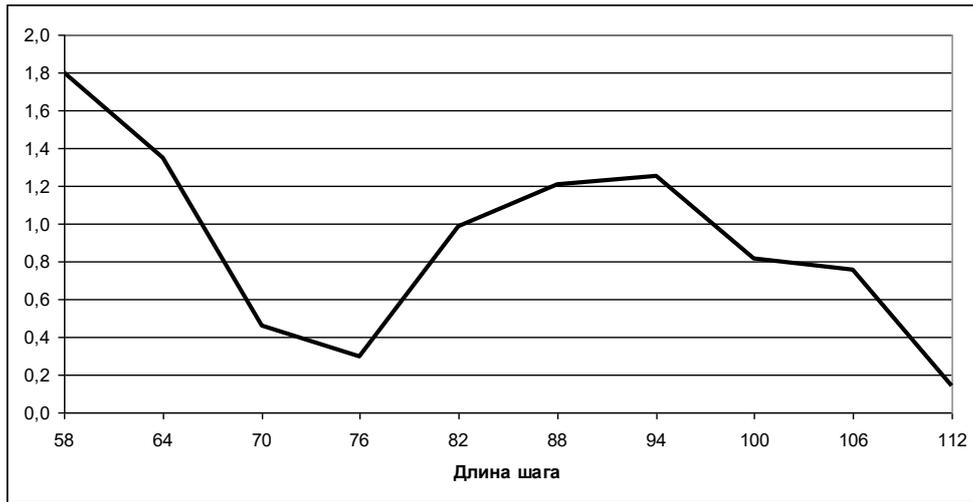


Рис. 4 – Индекс независимости левой и правой половин шага

Области, в которых индекс независимости значительно отличается от единицы, отвечают высокой корреляции между половинами шагов. Следующий уровень детализации дает совместное распределение этих величин (рис. 5, 6).

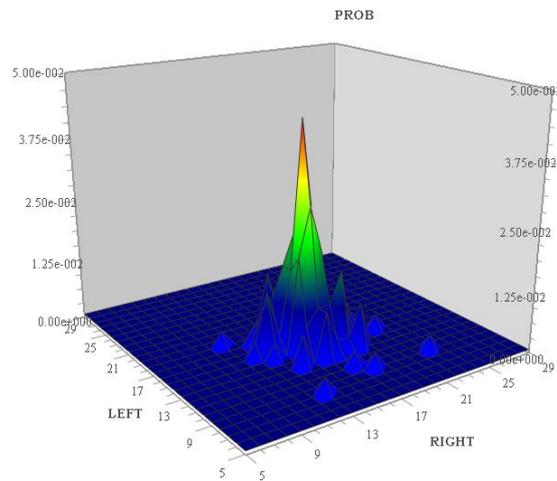


Рис. 5 – Совместное распределение длин левой и правой половин шага

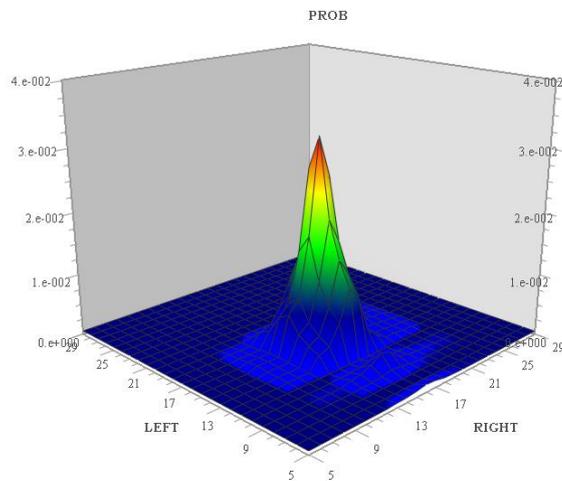


Рис. 6 – Произведение распределений длин левой и правой половин шага

На рис. 5, 6 сетка длин шагов представлена в укрупненном виде: в одном классовом интервале содержится 3 временных отсчета. Из этих рисунков следует, что совместное распределение унимодально, его максимум лежит выше максимума независимого произведения, ближайшее же окружение максимума, напротив, ниже, а периферия снова выше. Это находит отражение в структуре корреляционной функции длин полушагов (рис. 7), определяемой как разность между совместной плотностью распределения  $\Phi(\tau, \theta)$  (рис. 5) и произведением соответствующих одномерных плотностей (рис. 6):

$$C(\tau, \theta) = \Phi(\tau, \theta) - g(\tau)h(\theta). \quad (7)$$

Вид распределений  $g(\tau)$  и  $h(\theta)$  был показан выше на рис. 3.

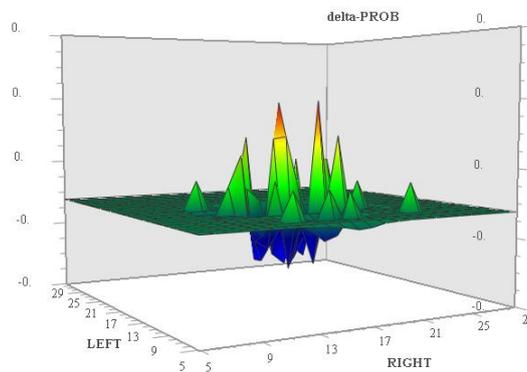


Рис. 7 – Корреляционная функция длин левой и правой половин шага

Вид корреляционной функции свидетельствует о том, что коэффициент независимости (рис. 4) отражает наличие корреляций, носящих системный характер. Корреляции и антикорреляции образуют чередующиеся зоны, близкие к концентрическим, вокруг моды распределения в пространстве длин полушагов.

Рассмотрим теперь распределение длин последовательных шагов (рис. 8).

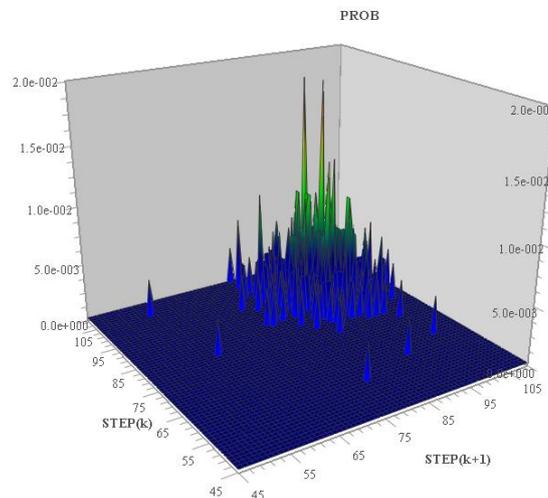


Рис. 8 – Совместное распределение длин последовательных шагов

Между последовательными длинами полных шагов не наблюдается заметной корреляции: как и для полушагов, этот коэффициент равен  $r = -0,29$ . Поэтому сами шаги можно приближенно считать независимыми один от другого. Строго говоря, надо различать шаги правой и левой ногами, поскольку могут быть индивидуальные особенности. В данном примере коэффициент корреляции длин шагов отдельно правой и левой ногами положителен и равен той же величине  $r = +0,29$ . Поэтому независимо от длины предыдущего шага длина следующего с наибольшей вероятностью попадает в окрестность моды.

Тем не менее, последовательность длин шагов образует заметные цуги продолжительностью примерно 100 шагов (полторы минуты движения) с большим и меньшим размахами колебаний длин. На рис. 9 приведен фрагмент ряда длин шагов.

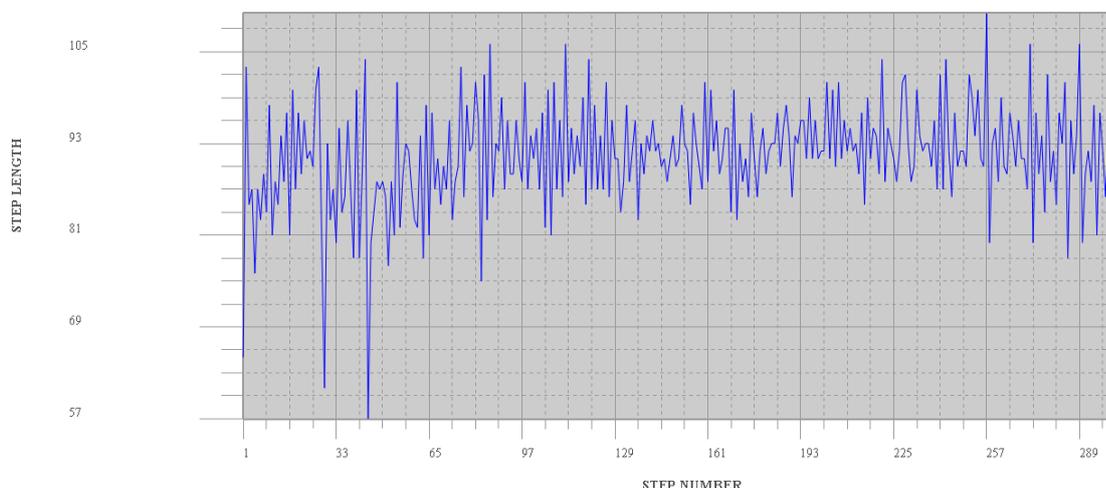


Рис. 9 – Последовательность длин шагов

Статистически выделение характерной длины  $N$  цуга происходит с помощью индекса нестационарности, представляющего собой отношение СУС  $\rho^*(N)$ , определяемого численным решением уравнения (2), к теоретическому СУС  $\varepsilon_0(N)$  для стационарных рядов. Последний есть решение уравнения

$$K\left(\sqrt{\frac{N}{2}}\varepsilon\right) = 1 - \varepsilon, \quad (8)$$

где  $K(z)$  есть функция Колмогорова [3], а  $N$  – длина выборки. Если индекс

$$J(N) = \frac{\rho^*(N)}{\varepsilon_0(N)} \quad (9)$$

больше единицы, ряд нестационарный. Зависимость индекса (9) от длины выборки для ряда последовательных длин шагов показана на рис. 10. Из него следует, что на малых выборках ряд стационарный, затем на выборках длин от 110 до 130 шагов ряд существенно нестационарный, после чего с дальнейшим увеличением длины выборки стационарность восстанавливается. Это поведение типично для двух чередующихся случайных процессов, которые в нашем

случае соответствуют двум режимам движения с заданной скоростью – более и менее устойчивым.

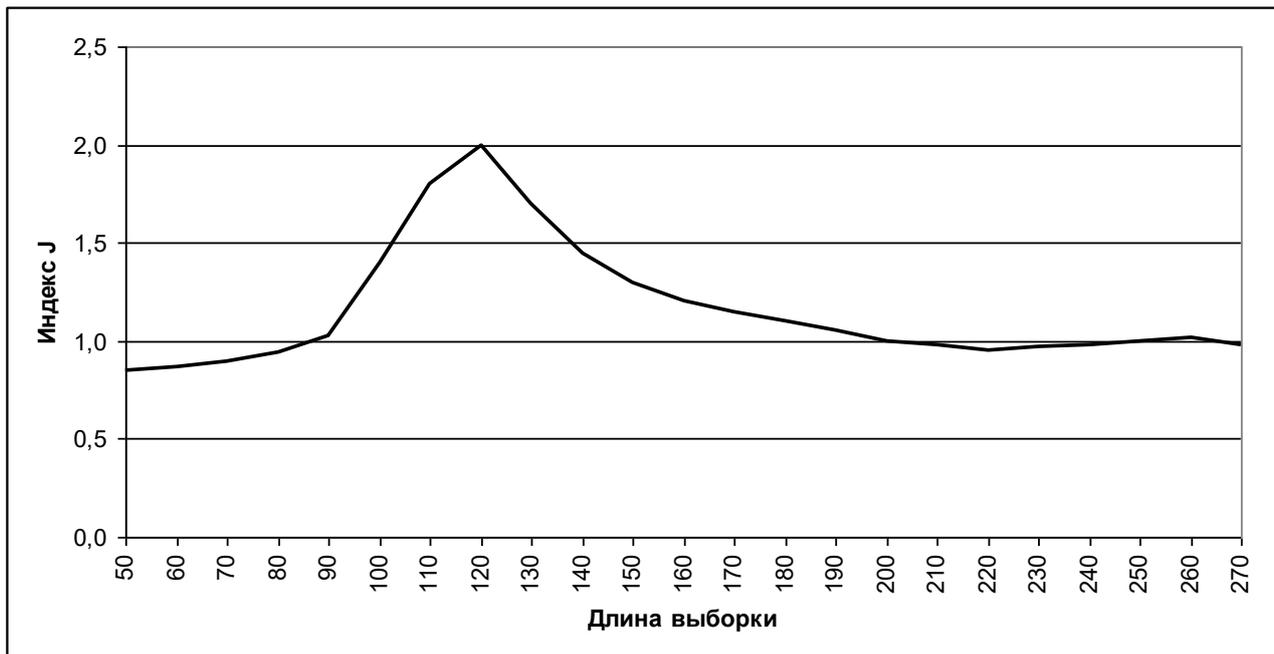


Рис. 10 – Индекс нестационарности ряда длин шагов

Таким образом, использование индекса нестационарности позволило выделить характерную длительность движения с определенной структурой локомоторных функций. В принципе, тот же эффект можно обнаружить с помощью коэффициента лаговой автокорреляции выборок, но для этого надо анализировать двумерный индикатор (перебирать выборки всех длин и все лаги), что вычислительно непродуктивно.

### 3. Анализ ряда интегральных давлений за один шаг

Рассмотрим статистику значений интегрального давления, оказываемого на опору в течение совершения одного шага. Напомним, что момент минимума давления в начале  $j$ -го шага был обозначен как  $n_j$ . Тогда интегральное давление за шаг определяется как сумма

$$P_j = \sum_{n=n_j+1}^{n=n_{j+1}} X(n). \quad (10)$$

Интеграл давления необходимо знать для нормировки паттерна движения, что будет сделано далее в п.4. Здесь мы проанализируем сам ряд этих величин.

Выяснилось, что давление за один фактический шаг практически полностью определяется длиной шага. Коэффициент корреляции между этими двумя рядами составил 0,996. Эта зависимость почти линейна (рис. 11). На каждую единицу увеличения длины шага приходится примерно 145 единиц увеличения давления. Коэффициент пропорциональности определяется весом человека и режимом движения. Отклонения от прямой линии вызваны, по-видимому, погрешностью измерений.

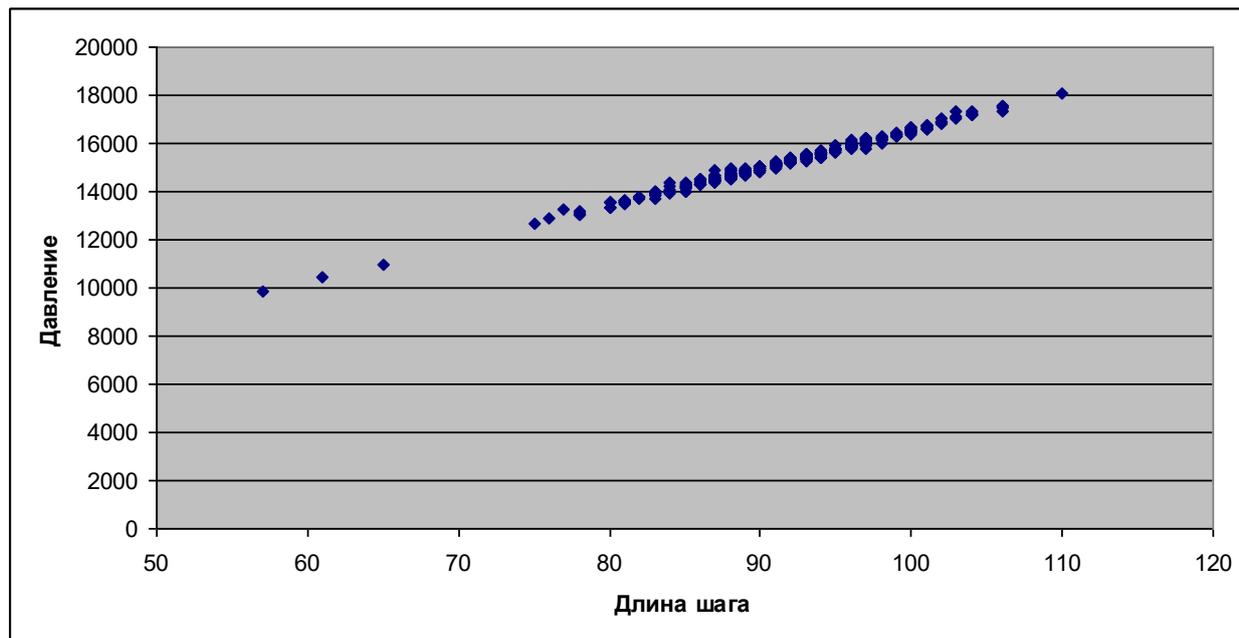


Рис. 11 – Зависимость между длиной шага и интегралом давления на опору

Следовательно, распределение давлений практически совпадает с распределением шагов по длинам. Индекс устойчивости среднего значения для него такой же, как и для ряда длин: отношение среднеквадратичного отклонения к среднему значению равно 0,07.

Полезно сравнить величину (10) с интегралом давления в окне постоянной ширины, равной средней длине  $\bar{T}$  шага. Это окно строится от вершины профиля текущего шага в фактической точке максимума  $m_j$ , левый конец окна находится в точке  $l_j = m_j - \bar{\tau}$ , а правый конец – в точке  $r_j = m_j + \bar{\theta}$ . Введем на  $j$ -ом шаге величину

$$S_j = \sum_{n=l_j+1}^{n=r_j} X(n). \quad (11)$$

То, что эта величина оказывается не постоянной, связано с различной формой профилей давления от соседних шагов, минимумы которых частично попадают в заданный интервал постоянной длины.

Распределения величин  $P$  и  $S$ , определяемых формулами (10) и (11) соответственно, приведены на рис. 12. Обратный индекс устойчивости  $\sigma_S / \bar{S}$  для давлений в постоянном окне равен  $6 \cdot 10^{-3}$ , что примерно в 10 раз меньше, чем величина  $\sigma_P / \bar{P}$ , то есть распределение величин (11) более устойчиво.

Отсюда следует, что ряд интегралов давлений в окне фактического шага обладает теми же свойствами нестационарности, что и распределение шагов по длине, а вот ряд давлений в окне постоянной ширины, привязанном к шагу, является стационарным. Он характеризует условия проведения измерений. Результаты разных локомоторных тестов сопоставимы между собой, если данный показатель  $\sigma_S / \bar{S}$  для них совпадает.

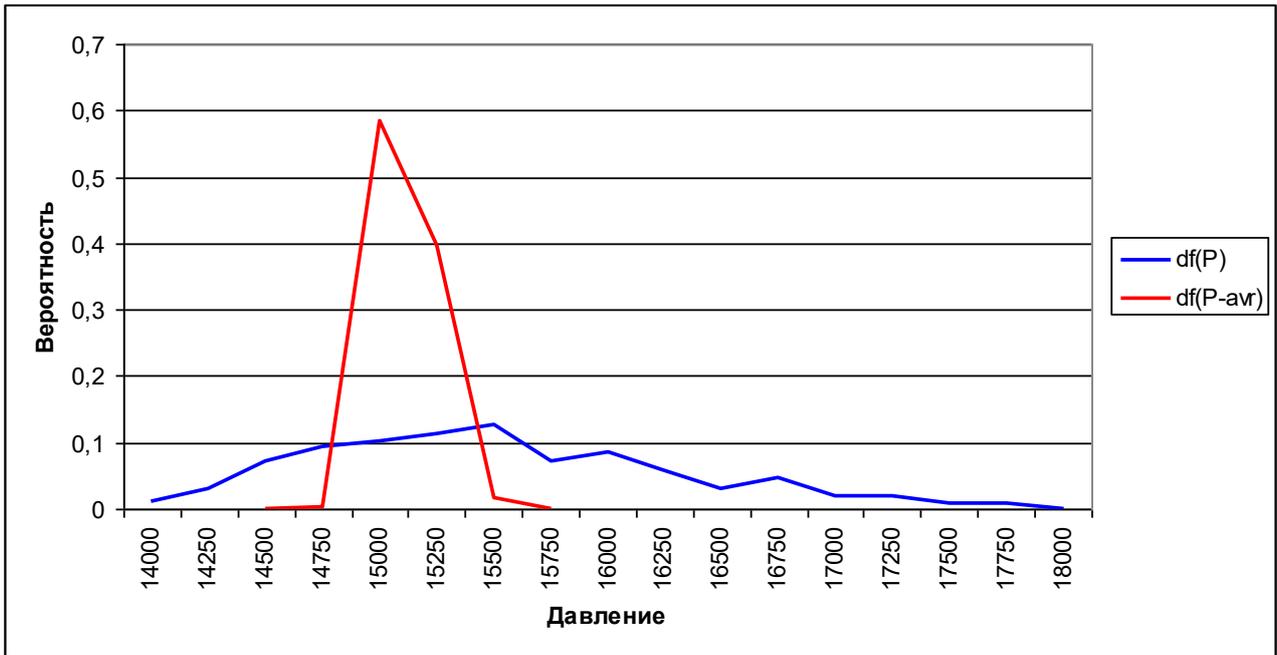


Рис. 12 – Распределения интегральных давлений за фактический шаг и в среднем окне

Далее мы рассмотрим индикатор устойчивости локомотивов, основанный на вариабельности формы профиля давления.

#### 4. Распределение отклонений профиля давления от паттерна

Если обратиться к рис. 1, то можно предположить, что особенности походки выражаются в последовательности импульсов давления, передаваемых опоре за один шаг. Следовательно, наряду с анализом длины шагов надо изучить вопрос об изменчивости формы профиля давления при сравнении между собой последовательности шагов.

Чтобы унифицировать сравнение профилей давления по шагам, проведем нормировку профиля каждого шага на площадь под кривой, т.е. на интегральный перенос импульса (10) через стопу в течение шага. Рассмотрим нормированную величину суммарного давления  $x_j(n)$  на временном отсчете  $n$  в течение квазипериода длительностью  $T_j$ :

$$x_j(n) = \frac{X(n)}{P_j}, \quad P_j = \sum_{n=n_j+1}^{n=n_{j+1}} X(n); \quad n_j + 1 \leq n \leq n_{j+1}. \quad (12)$$

Поскольку носители разных профилей (то есть длительности  $T_j$ ), вообще говоря, не совпадают, надо определить правило сравнения профилей между собой. Основным требованием является то, что при проведении сравнения форма профиля не должна искажаться. В работе [1] была проведена нормировка паттерна в постоянном окне, т.е. нормировка на величину  $S_j$  согласно (11). В результате это окно частично захватывало фрагменты другого шага, что приводило к искажению формы профиля давления. В настоящей

работе мы предлагаем сравнивать профили отдельных шагов, совмещая точки максимумов. Пусть  $m$  – координата совмещенных максимумов двух нормированных профилей,  $\tau_1$  и  $\tau_2$  представляют длины левых частей, а  $\theta_1$  и  $\theta_2$  длины правых. Обозначим  $\tau = \max(\tau_1, \tau_2)$ ,  $\theta = \max(\theta_1, \theta_2)$ . Рассмотрим окно  $[m - \tau, m + \theta]$ , в котором доопределим при необходимости отсутствующие части сравниваемых профилей нулями. В этом окне сравниваемые профили обозначаем как  $x_1(n)$  и  $x_2(n)$ . Средний профиль  $\bar{x}(n)$  определяется тогда формулой

$$\bar{x}(n) = \frac{x_1(n) + x_2(n)}{2}, \quad (13)$$

а расстояние между ними определяется в норме L1:

$$\delta_{12} = \sum_{n=m-\tau}^{n=m+\theta} |x_1(n) - x_2(n)|. \quad (14)$$

Аналогично поступим при определении среднего профиля по всему имеющемуся набору шагов. Полученный средний профиль  $\bar{x}(n)$  будем называть паттерном шага (рис. 13). Длина этого шага равна  $\max_j(\tau_j + \theta_j)$ .

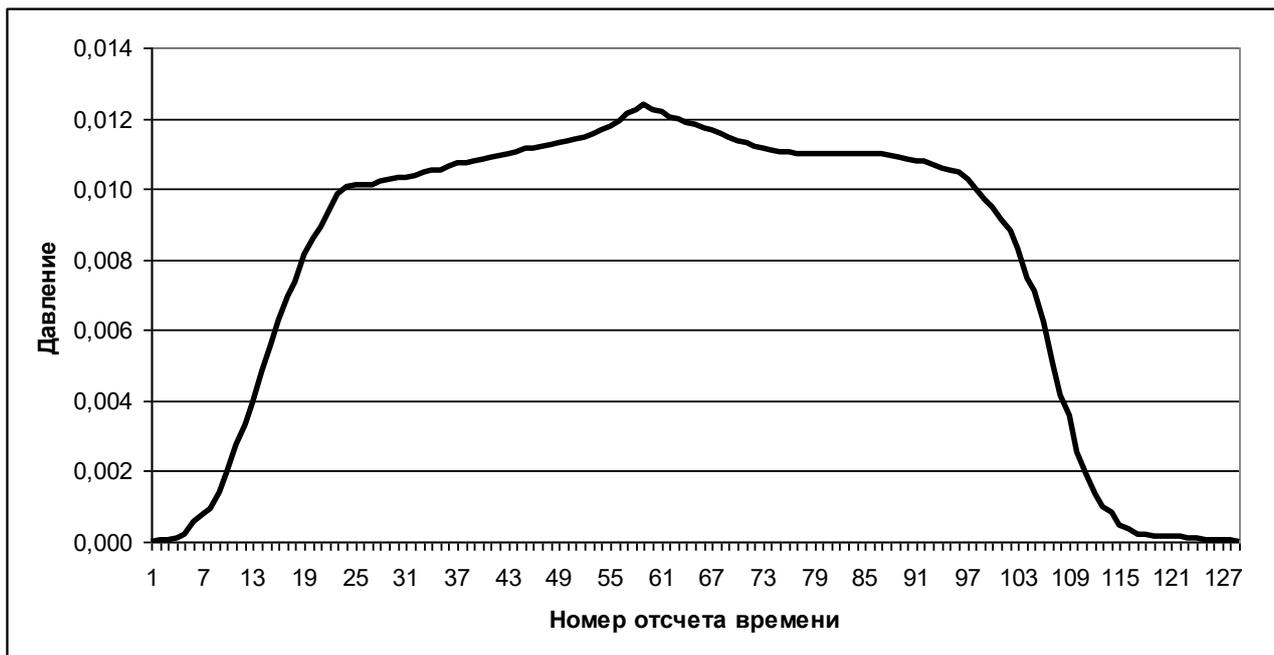


Рис. 13 – Паттерн нормированного профиля давления

Интерес представляют как величины отклонения нормированных профилей отдельных шагов от паттерна, так и отклонения профилей соседних шагов. Иногда вариация соседних данных бывает меньше, чем отклонение от среднего. Рассмотрим сначала ряд отклонений соседних профилей. Это ряд значений, количество которых равно числу шагов минус один. Величины отклонений вычисляются по формуле (14):  $\delta_{12}, \delta_{23}, \delta_{34}, \dots$ . Фрагмент последовательности этих величин приведен на рис. 14.

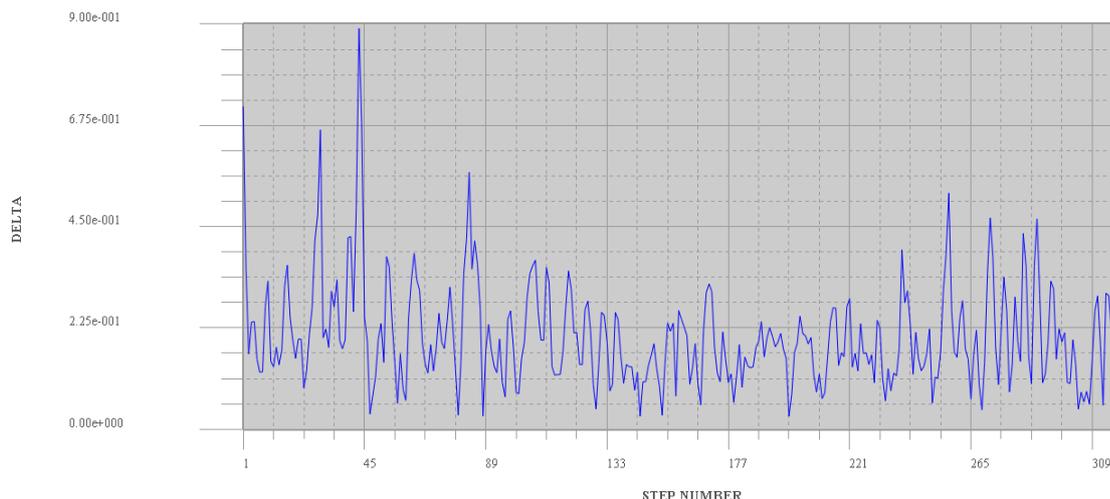


Рис. 14 – Взаимные отклонения нормированных профилей давления

Сравнивая полученные данные с последовательностью длин шагов на рис. 9, которым, как было выяснено раньше, пропорциональны интегралы профилей, видим, что и для величин отклонений профилей характерна та же специфика. Следовательно, нестационарность ряда взаимных отклонений профилей определяется тем же индексом, что и на рис. 10. Примеры распределений отклонений для цугов с узким и широким размахами, а также общее распределение отклонений приведено на рис. 15.



Рис. 15 – ВПФР взаимных отклонений нормированных профилей давления

Из рис. 15 следует тот же вывод, что и из рис. 9, а именно: наблюдаются две моды движения – устойчивая (ВПФР df2) и более хаотичная (ВПФР df1).

Отклонения профилей отдельных шагов от эталонного паттерна

$$d_i = \sum_{n=m-\tau}^{n=m+\theta} |x_i(n) - \bar{x}(n)| \quad (15)$$

имеют качественно такое же распределение, что и распределение взаимных отклонений профилей, только с меньшим размахом выборки.

Наряду с самым выборочным распределением индикаторами состояния человека в процессе тренировки являются среднее отклонение  $\bar{d}$ , дисперсия отклонений  $\sigma_d^2$  и обратное нормированное среднее  $\mu_d = \sigma_d / \bar{d}$ . Для отклонений (15) эти величины равны  $\bar{d} = 0,16$ ,  $\sigma_d = 0,08$ ,  $\mu_d = 0,5$ . Точка стационарности уровня значимости распределения отклонений равна  $d^* = 0,20$ . Справа от этой точки находится 20 % нормировки распределения.

Рассмотрим теперь не интегральные, а локальные отклонения профиля шага от паттерна в пределах  $i$ -го шага:

$$z_i(n) = x_i(n) - \bar{x}(n), \quad m_i - \tau_i \leq n \leq m_i + \theta_i. \quad (16)$$

Исследуем на стационарность совокупность  $\{z_i(n)\}$  в течение одного теста. Для этого составим статистики (1-2) и построим индекс нестационарности (9) в зависимости от длины  $N$  встык-выборок. Фрагмент ряда отклонений (16) приведен на рис. 16, а индекс нестационарности – на рис. 17.

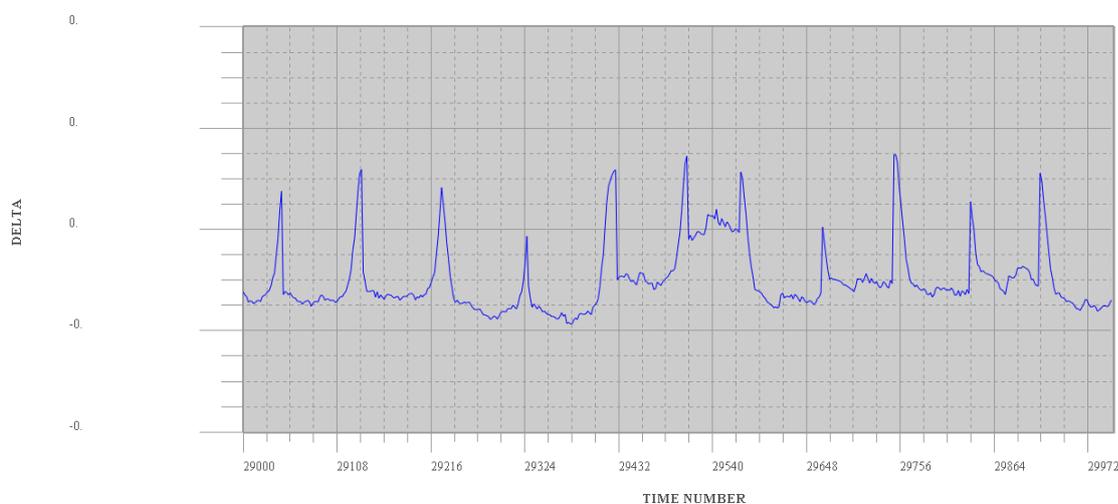


Рис. 16 – Ряд отклонений нормированных профилей давления от паттерна

Этот ряд отличается от последовательности интегральных отклонений (см. рис. 14) отсутствием явных цугов. Амплитуда колебаний в целом похожа на профиль давления по шагам, но максимумы отклонений не всегда совпадают с максимумами пошаговых профилей. В результате оказывается, что данный ряд ведет себя существенно нестационарно, причем с увеличением длины выборки нестационарность возрастает. Это означает, что с течением времени походка человека не стабилизируется, а, наоборот, становится более хаотичной.

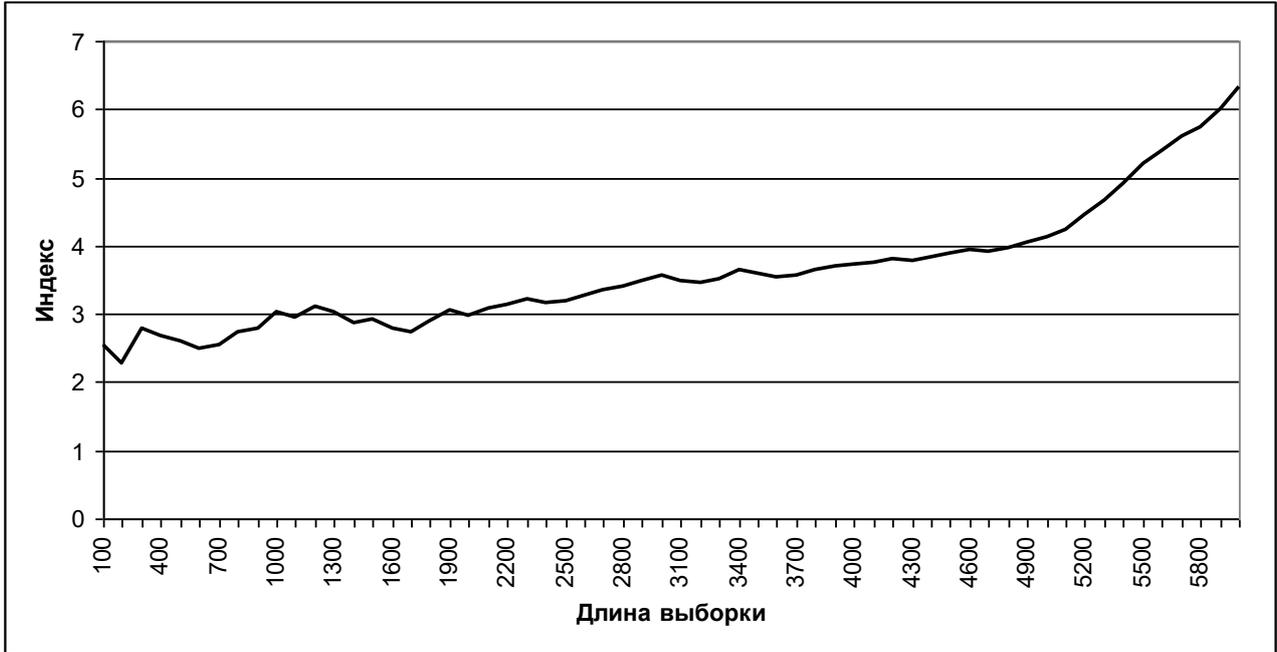


Рис. 17 – Индекс нестационарности ряда отклонений нормированных профилей давления от паттерна

#### 4. Модель эволюции распределения отклонений

Поскольку ряд отклонений (16) оказался нестационарным, эволюцию его выборочных распределений можно исследовать в рамках кинетической модели. Пусть  $f_N(z, t_k)$  есть плотность распределения выборки длины  $N$ , где время  $t_k$  отвечает правому концу  $k$ -ой выборки, т.е. равно номеру  $kN$ . Рассмотрим изменение этой ВПФР в скользящем окне длины  $N$ . В качестве модели эволюции возьмем уравнение Фоккера-Планка:

$$\frac{\partial f_N(z, t)}{\partial t} + \frac{\partial(u_N(z, t)f_N(z, t))}{\partial z} = \frac{\lambda(t)}{2} \frac{\partial^2 f_N(z, t)}{\partial z^2}. \quad (17)$$

Параметр сноса  $u_N(z, t)$  определяется по совместному распределению значений  $z(n)$  и их приращений  $\dot{z}(n) = z(n+1) - z(n)$  согласно равенствам:

$$u_N(z, t)f_N(z, t) = \int \dot{z} \Phi_N(z, \dot{z}; t) dz, \quad f_N(z, t) = \int \Phi_N(z, \dot{z}; t) dz. \quad (18)$$

Параметр диффузии определяется по правилу эволюции выборочной дисперсии согласно [2]:

$$\lambda(t) = \frac{d\sigma^2}{dt} - 2\text{cov}_{z,u}, \quad \sigma^2(t) = \int (z - m(t))^2 f_N(z, t) dz, \quad m(t) = \int z f_N(z, t) dz. \quad (19)$$

Изменение формы профиля движения в этих терминах означает нестационарность ВПФР, то есть отличие от нуля производной по времени в (17). Возьмем для примера длину выборки  $N = 10^4$ . Характерные ВПФР встык-выборок приведены на рис. 18. Параметры уравнения модели (17) показаны на рис. 19-20. Видно, что скорость и коэффициент диффузии не постоянны, поэтому их поведение может служить индикатором состояния человека.

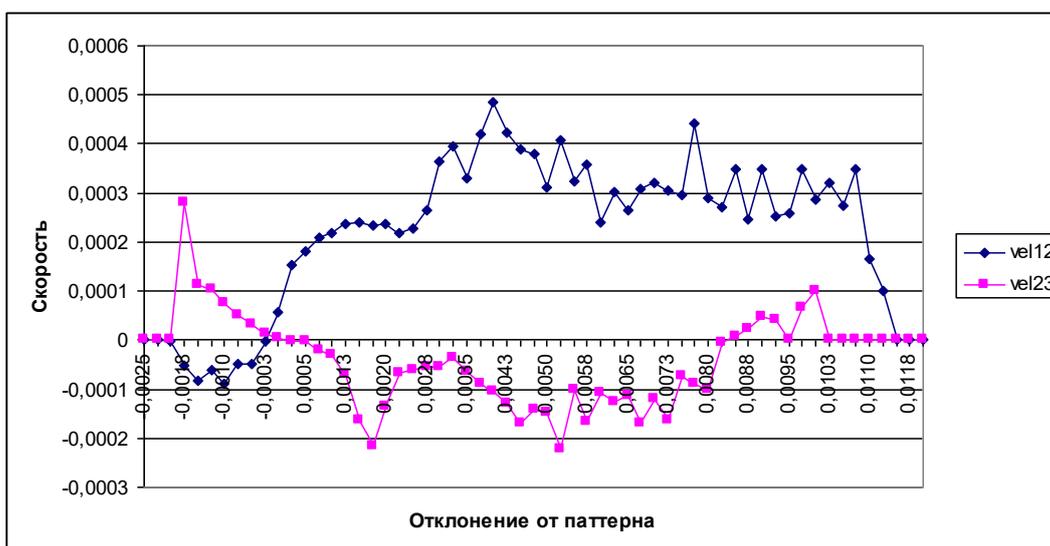
Рис. 18 – Распределения встык-выборок длиной  $10^4$ 

Рис. 19 – Скорости изменения ВПФР

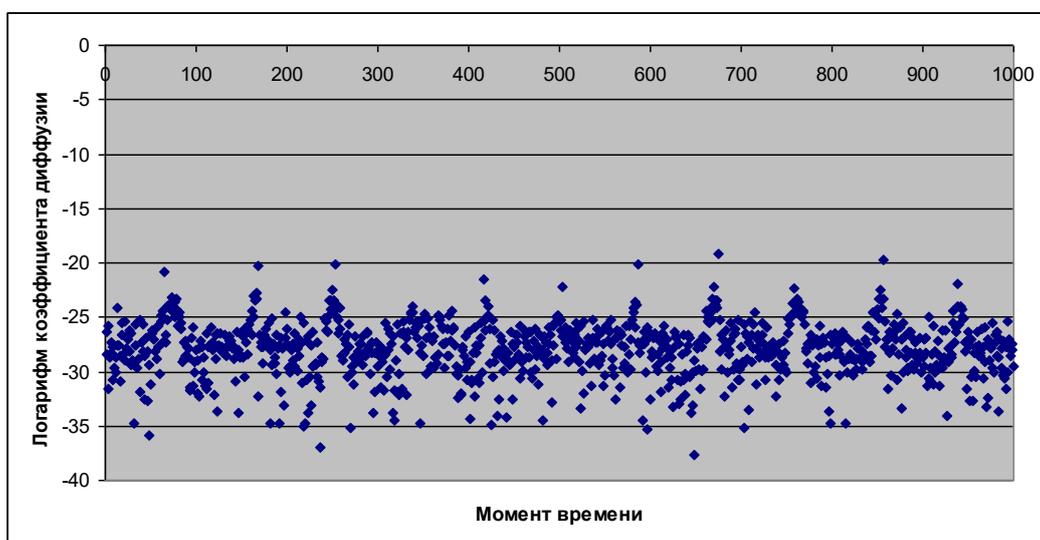


Рис. 20 – Зависимость коэффициента диффузии от времени

Итак, параметры  $u$ ,  $\lambda$  кинетического уравнения (17) представляют собой еще один класс характеристик устойчивости локомоций. Изменение этих параметров в течение одного локомоторного теста или при сравнении разных тестов позволяет выявить механику перестройки локомоторных функций: связана эта перестройка с тенденцией (изменение скорости  $u$ ) или обусловлена общей хаотизацией движения (изменение диффузии  $\lambda$ ).

## 5. Сравнение тренировок до полета и после полета

Рассмотрим применение описанной методики к анализу локомоторных тестов космонавта до полета и после полета. В качестве метрик сравнения состояния локомоторных функций используем индекс нестационарности распределения длин шагов и распределения ряда отклонений профилей шагов от паттерна, а также коэффициент независимости полушагов, коэффициент устойчивости среднего значения длин шагов, параметры кинетической модели (снос и диффузия).

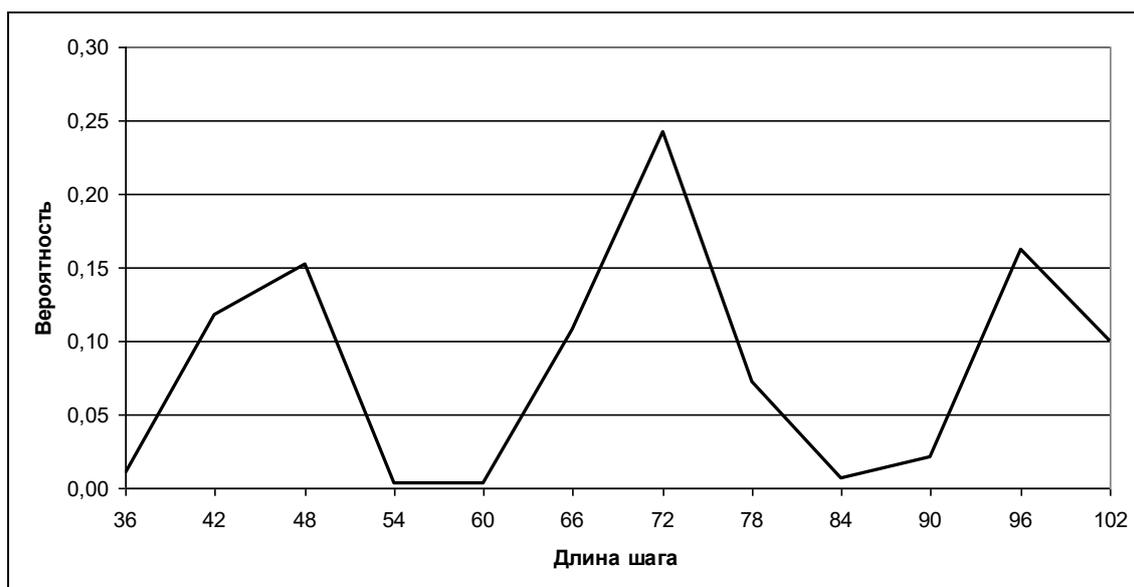


Рис. 21 – Эмпирическое распределение длины шага после полета

Сравнение рис. 21 с рис. 2 показывает, что после полета режим движения резко поменялся. Вместо одной моды распределение длин теперь имеет три максимума. Первые два максимума на коротких длинах новые, третий максимум остался примерно на том же уровне, что и на рис. 2. Максимумы приблизительно эквидистантны: расстояния между ними составляют около 30 единиц отсчета времени.

Важным отличием последовательности длин шагов на тесте после полета от сессии до полета является то, что ряд стал стационарным. Это означает, что три режима ходьбы (моды на рис. 21) не образуют цугов, а идут хаотично, без системных переключений, и эта хаотичность стационарна.

Коэффициент корреляции между временем опускания ноги и временем подъема теперь равен 0,35, т.е. сменил знак (стал положительным) и примерно на 20 % увеличился. Распределения полушагов (рис. 22) стали симметричны и раздвинулись.

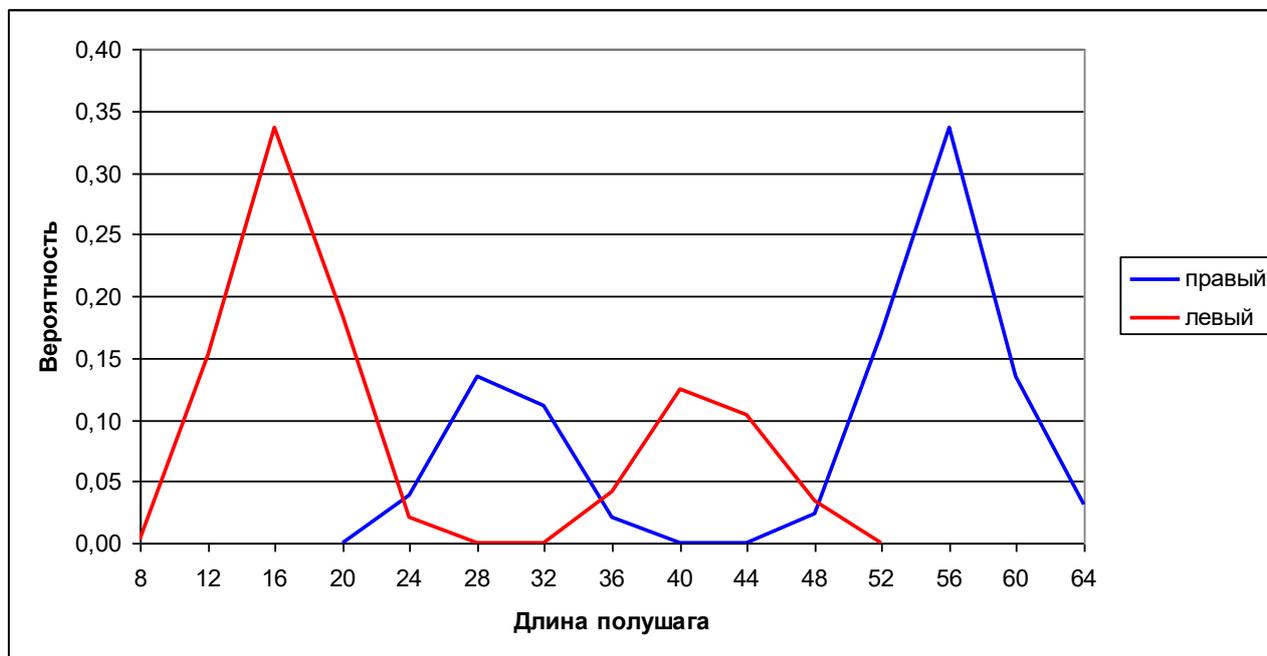


Рис. 22 – Эмпирическое распределение длины полушага после полета

Сравнение рис. 22 и рис. 3 показывает, что в распределениях полушагов по длинам появились вторые моды, левый полушаг (опускание ноги) стал существенно короче, чем правый (подъем), который, в свою очередь, стал длиннее. Устойчивость полушагов уменьшилась: отношение стандартного отклонения к среднему значению для левого шага теперь равно 0,27 (возросло в 2 раза), а для правого 0,53 (возросло в 5 раз). Таким образом, фаза подъема стала более неустойчивой, чем фаза опускания, то есть их роли при ходьбе поменялись. В определенном смысле поменялась стратегия движения: вместо того, чтобы контролировать намерение идти (подъем ноги), теперь организм контролирует остановку (опускание ноги).

Анализ индекса независимости полушагов (рис. 23 и рис. 4) показывает, что связь между полушагами увеличилась: этот индекс во всей области длин шагов заметно отличается от единицы. С этим связано интересное изменение совместного распределения длин полушагов (рис. 24 и рис. 5). Носитель этого распределения состоит из четырех несвязных областей. Это означает, что небольшие перекрытия распределений фаз опускания и подъема на рис. 22 не реализуются совместно, что более детально показывает картину зависимости полушагов. Следовательно, система локомоций не совсем разладилась: в ней произошла перестройка стратегии, так что если раньше фазы шага были слабо связаны между собой, то теперь связь усилилась.

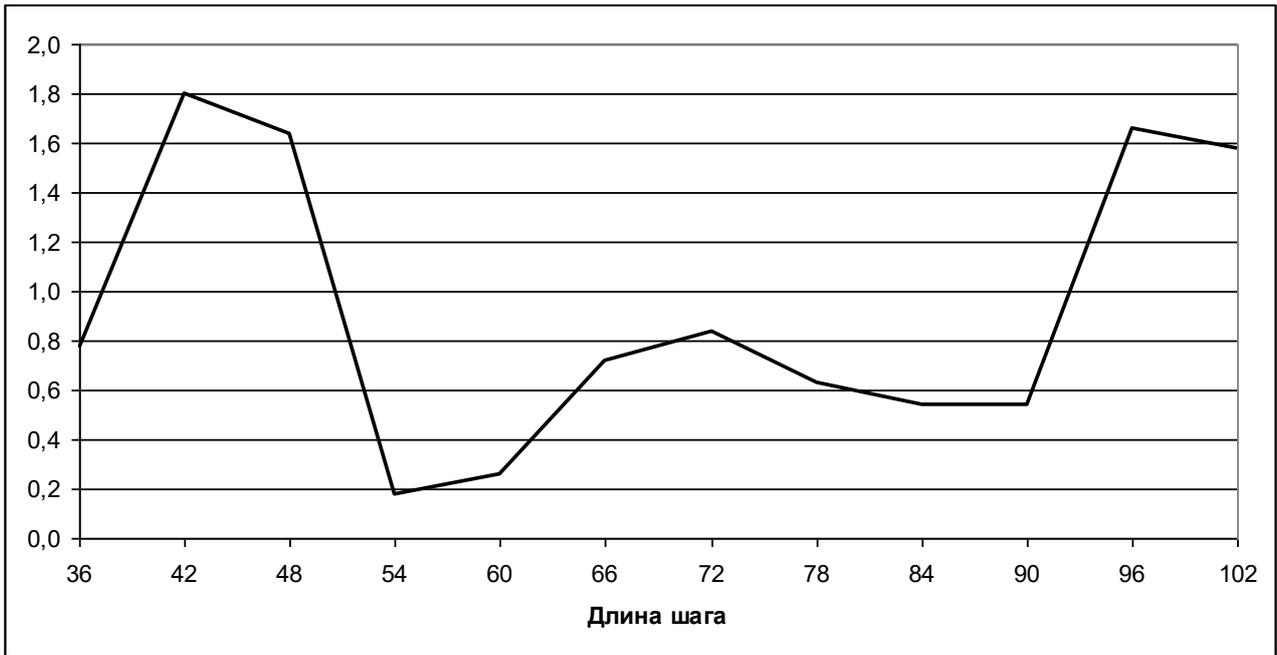


Рис. 23 – Индекс независимости левой и правой половин шага после полета

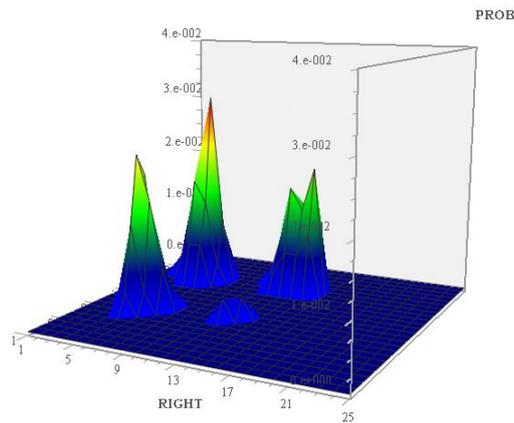


Рис. 24 – Совместное распределение длин полушагов после полета

Претерпел заметные изменения и паттерн профиля давления за один шаг (рис. 25 и рис. 13). Ширина максимума сузилась, а сам максимум стал больше. Расстояние в норме  $L1$  между паттернами до полета и после полета равно 0,4. Это в 2,5 раза больше, чем среднее расстояние между профилем и паттерном шага по данным обеих тренировок. Следовательно, профиль шага после полета значительно изменился.

Важно подчеркнуть, что индекс нестационарности отклонений профилей шагов от паттерна уменьшился по сравнению с тестом до полета примерно на 20-30 %. Ряд отклонений по-прежнему нестационарный, индекс растет с увеличением длины выборки, но в меньшей степени. Так, выборки длин меньше 1000 имеют индекс порядка 2, затем индекс возрастает до 3 для выборок длин 3-5 тыс. Следовательно, хаотичность движения возросла, что

показывают коэффициенты устойчивости длин шагов, но она стала более стационарной.

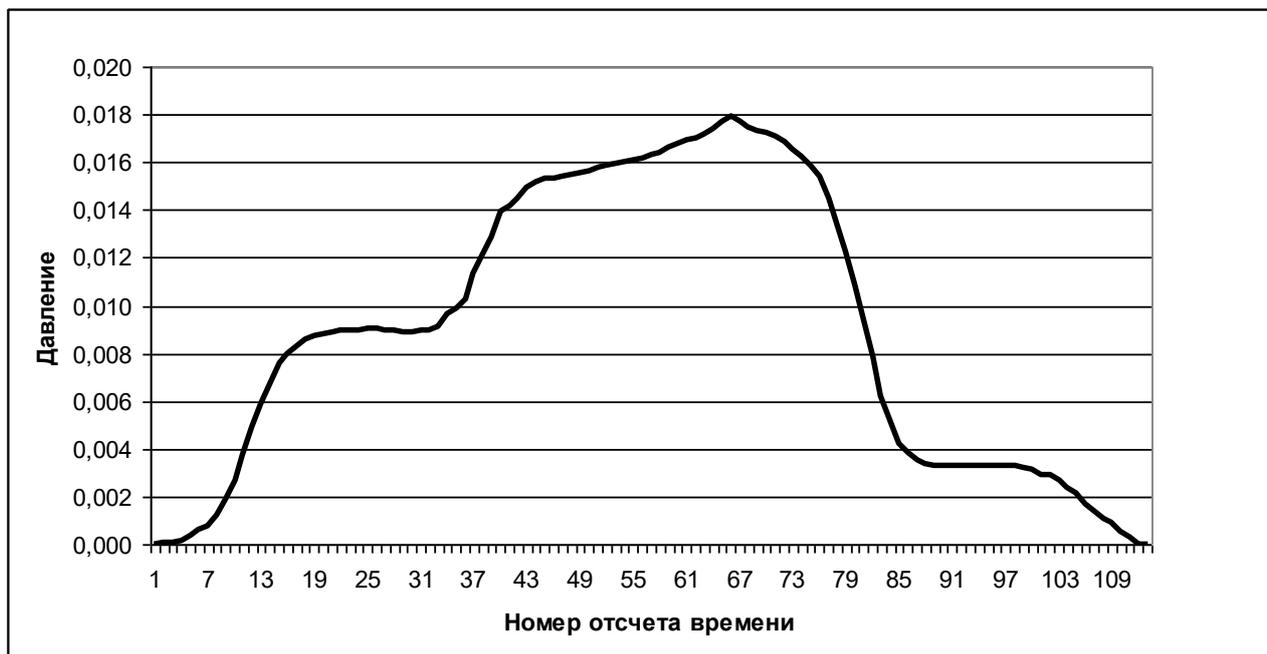


Рис. 25 – Паттерн нормированного профиля давления после полета

Рассмотрим, как изменились параметры кинетического уравнения (17). Типичные ВПФР встык-выборки отклонений профиля давления от паттерна показаны на рис. 26. Эти распределения связаны между собой уравнением Фоккера-Планка, параметр сноса для которого показан на рис. 27.

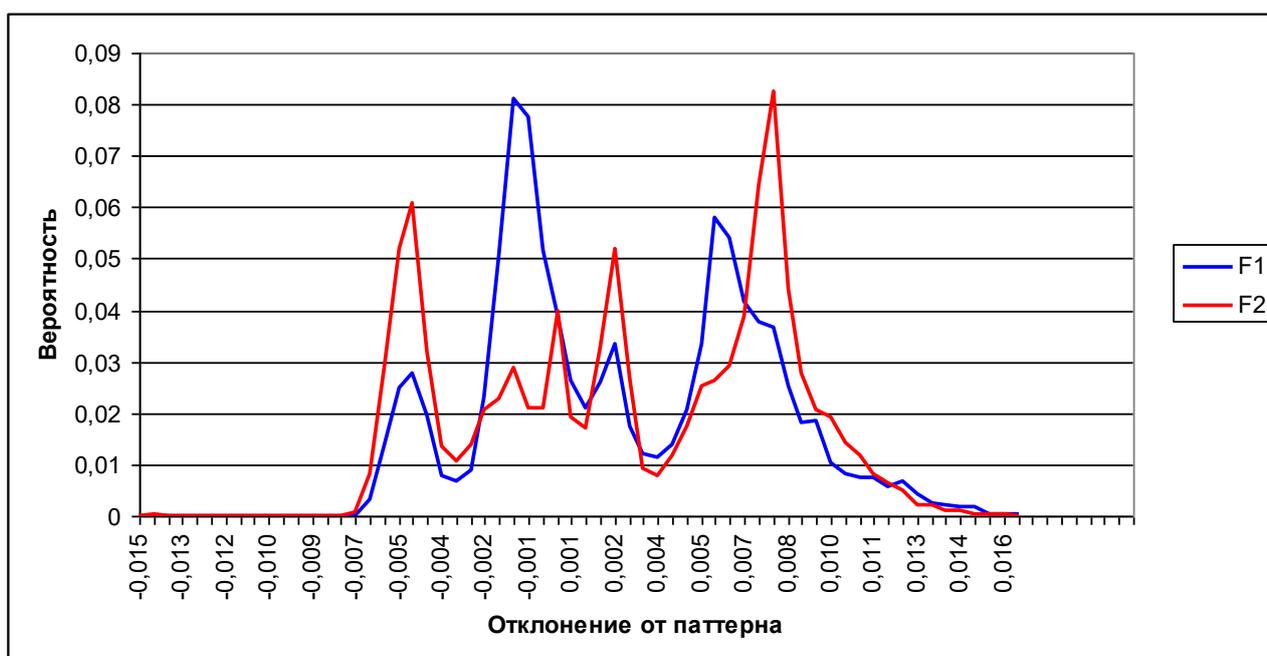


Рис. 26 – Распределения встык-выборки длиной  $10^4$  после полета

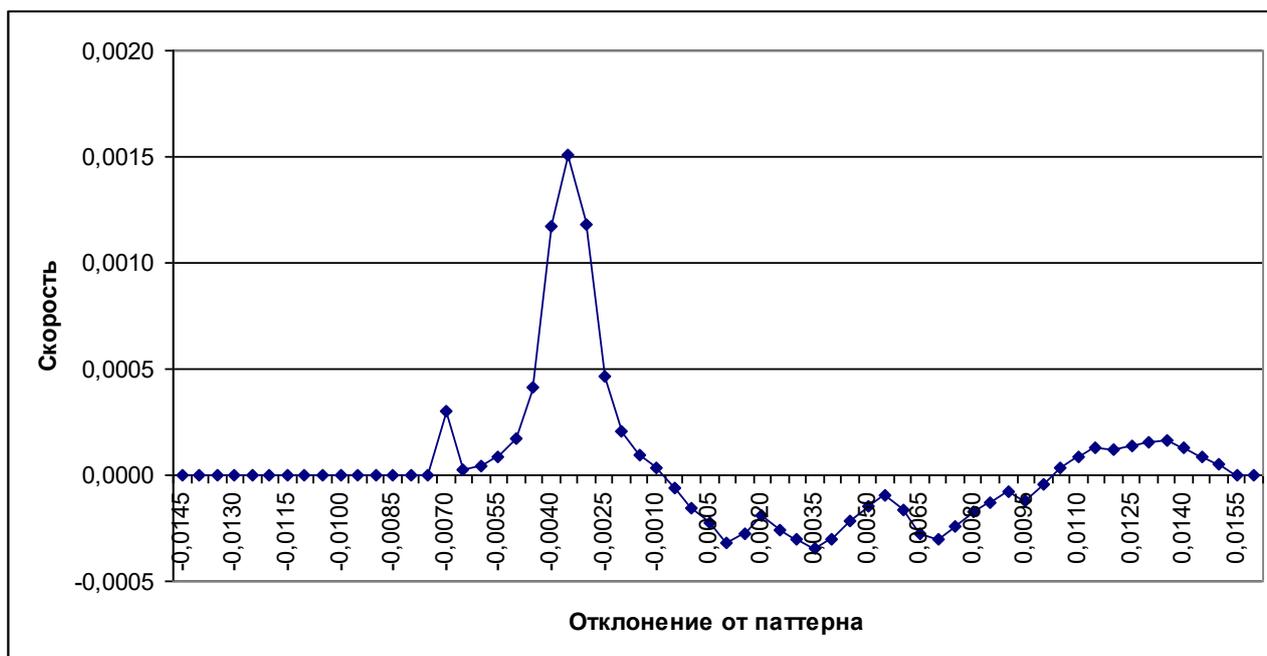


Рис. 27 – Скорость изменения ВПФР после полета

По сравнению с тренировкой до полета, у скорости появился максимум, примерно в 3 раза превосходящий типовые значения на рис. 19. Коэффициент диффузии увеличился в 10 раз, что связано с отличием вида ВПФР на рис. 26 от унимодального. Следовательно, по значениям параметров кинетического уравнения можно судить о степени разладки локомоторных функций.

## 6. Заключение

В работе исследованы статистики, получаемые после обработки биометрических данных, характеризующих локомоторные функции человека. Для анализа локомоций были введены семь индикаторов. Эти индикаторы следующие. Во-первых, это индекс нестационарности длин шагов и ряда отклонений профиля давления от паттерна шага. Во-вторых, это индикаторы устойчивости распределений, такие как индекс независимости полушагов и их корреляция, а также коэффициент устойчивости средних значений распределений длин шагов. Третьим типом индикаторов являются параметры сноса и диффузии в модельном уравнении Фоккера-Планка относительно распределения профиля давления.

Проведен анализ результатов локомоторных тестов космонавта до полета и после полета. Построены паттерны опорных реакций по показаниям датчика давления до полета и после полета. Выяснено, что паттерны заметно различаются по своим статистическим характеристикам в указанных экспериментах.

По результатам эксперимента выяснилось, что пребывание в невесомости вносит разладку в локомоторные функции, но она довольно специфична. Повышается хаотичность движения, но снижается уровень нестационарности вычисляемых статистик. Повышается связь между фазами шага, но снижается

устойчивость распределений длин этих фаз. Это означает, что наблюдается повышение вариативности и уменьшается стандартность шага. С другой стороны, снижение индекса нестационарности показывает, что это изменение вариативности становится более стандартным.

Также были выявлены несколько режимов движения, которые определяются явно выраженными максимумами распределения статистик. Это может быть расценено как формирование нового двигательного навыка – выполнения локомоций на неустойчивой опоре.

Построенные статистики оказались эффективными индикаторами состояния локомоторных функций. Их исследование позволяет получить новые знания об изменении стратегии движения в условиях космического полета. Эта информация необходима для повышения эффективности профилактики гипогравитационных нарушений в нервно-мышечной системе человека во время космического полета. В настоящее время в качестве одной из концепций для построения системы профилактики гипогравитационных нарушений по отношению к мускулатуре, обеспечивающей поддержание позы в гравитационном поле Земли, рассматривается предположение о триггерной роли отсутствия стимуляции рецепторов опоры в условиях невесомости. Знания, полученные в настоящем исследовании, открывают перспективы развития персонифицированного подхода в профилактике гипогравитационных нарушений в интересах сверхдлительных межпланетных миссий на основе построения математических моделей для оценки индивидуальных стратегий локомоций человека в условиях космического полета.

### **Список источников**

1. Воронина М.Ю., Лысова Н.Ю., Иванов Д.С., Орлов Ю.Н., Фомина Е.В. Вариабельность локомоторных стратегий человека в условиях длительного космического полета // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2019. № 91. 19 с.
2. Орлов Ю.Н. Кинетические методы исследования нестационарных временных рядов. – М.: МФТИ, 2014. – 276 с.
3. Королюк В.С., Портенко Н.И., Скороход А.В., Турбин А.Ф. Справочник по теории вероятностей и математической статистике. – М.: Наука, 1985. – 640 с.