



Завалишин Д.А., Беляев М.Ю.,  
Сазонов В.В.

Исследование  
вибрационных  
микроускорений на борту  
Международной  
космической станции

**Рекомендуемая форма библиографической ссылки:** Завалишин Д.А., Беляев М.Ю., Сазонов В.В. Исследование вибрационных микроускорений на борту Международной космической станции // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2010. № 42. 32 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2010-42>

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
Ордена Ленина  
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ  
им. М.В. Келдыша

Д.А. Завалишин, М.Ю. Беляев, В.В. Сазонов

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИОННЫХ МИКРОУСКОРЕНИЙ  
НА БОРТУ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ**

Москва – 2010

## Аннотация

Описаны результаты исследования вибрационных микроускорений на борту Международной космической станции (МКС). Исследование проведено с использованием данных измерений низкочастотного акселерометра MAMS и высокочастотного акселерометра SAMS. Для исследования были выбраны 6 отрезков измерений, выполненных в 2005 г., на которых станция совершала полет в дежурной орбитальной ориентации, двигатели ориентации не включались, экипаж отдыхал. На выбранных отрезках анализировались дискретный и непрерывный спектры. Найдены наиболее значимые возмущения с дискретным спектром (циклические тренды). В рамках модели авторегрессии 2-го порядка определены параметры наиболее значимых возмущений с непрерывным спектром. Данное исследование выполнено в рамках технического эксперимента “Среда МКС”.

**D.A. Zavalishin, M.Yu. Belyaev, V.V. Sazonov. Analysis of the vibration microaccelerations onboard of the International Space Station.** We describe the results of the analysis of the vibration residual accelerations onboard of the International Space Station (ISS). The investigation was realized basing on the measurements of the low-frequency accelerometer MAMS and the high-frequency one SAMS. We picked out 6 data segments obtained in 2005, in which the station was flying in the nominal orbital attitude, the engines were switched off and the crew was resting. We analyzed the discrete and the continuous spectrums of these segments. We found the most significant disturbances with the discrete spectrum (cyclic trends) and, basing on the autoregression models of the 2-nd order, we estimated parameters of the most significant disturbances with the continuous spectrum. The analysis was carried out under the technical experiment “ISS Environment”.

**1. Вибрационные микроускорения на станции.** Низкочастотный акселерометр MAMS и высокочастотный акселерометр SAMS установлены в модуле Lab Американского сегмента МКС. Показания этих приборов использованы ниже для изучения вибрационных микроускорений на борту станции. MAMS измеряет кажущееся ускорение в собственной системе координат  $z_1 z_2 z_3$ , направления осей которой в строительной системе с СМ задаются формулами  $z_1 = -x$ ,  $z_2 = -y$  и  $z_3 = z$ . Обе эти системы – правые, декартовы. Ось  $x$  параллельна продольной оси СМ и направлена от его переходного отсека к агрегатному отсеку, ось  $y$  перпендикулярна оси вращения солнечных батарей СМ. Номинально частоты “сырых” данных акселерометра MAMS лежат в диапазоне от 0 до 1 Гц. Однако эти данные получены со скоростью выборки 10 измерений в секунду, и в их спектре присутствуют частоты до 5 Гц. Все сколько-нибудь значимые возмущения имеют частоты менее 2 Гц.

SAMS измеряет кажущееся ускорение в собственной системе координат  $z'_1 z'_2 z'_3$ , связанной с системой  $xuz$  СМ формулами  $z'_1 = z$ ,  $z'_2 = y$  и  $z'_3 = -x$ . Головки акселерометра SAMS имеют настраиваемое значение частоты обрезания. В работе использовались данные измерений головки F02, для которой частота обрезания составляла 100 Гц. Головка F02 имеет скорость выборки 250 измерений в секунду, и в спектре данных ее измерений заметны частоты до 125 Гц. Ниже компоненты векторов указываются в строительной системе  $xuz$  СМ.

Вибрационные микроускорения на борту станции представляют собой суперпозицию колебаний с дискретным и непрерывным спектрами. Происхождение микроускорений дискретного спектра вызвано, как правило, работой двигателей вентиляторов и других систем обеспечения жизнедеятельности экипажа. Обычно такие устройства создают в стабильных режимах работы возмущения с постоянными частотами.

К вибрационным микроускорениям относятся и микроускорения, создаваемые упругими колебаниями корпуса МКС, который представляет собой нежесткое тело. Эти колебания вызываются различными причинами, в частности, работой экипажа. Если возмущения носят случайный характер, то колебания корпуса имеют, как правило, непрерывный спектр. Ниже микроускорения непрерывного спектра будем считать обусловленными нежесткостью корпуса МКС. Микроускорения с дискретным спектром, обусловленные функционированием бортовых устройств, возникали бы и в том случае, если бы корпус станции был абсолютно жестким телом.

**2. Описание исследуемых данных и методика исследования.** Для исследования вибрационных микроускорений на борту МКС были выбраны по 3 отрезка данных измерений MAMS и SAMS. Ниже они обозначаются как отрезки 1–3 и 4–6 соответственно. Отрезки 1, 4 приходятся на 16 июля, отрезки 2, 5 – на 20 июля, отрезки 3, 6 – на 24 июля 2005 г. Каждый из отрезков содержит 4096 последовательных значений измерений одного из акселерометров.

На выбранных отрезках станция совершала полет в дежурной орбитальной ориентации. При этом не совершались динамические операции, и не вклю-

чались двигатели управления ориентацией станции. Экипаж отдыхал, и возмущения, вызываемые его активной жизнедеятельностью, отсутствуют. Выбор отрезков вызван желанием изучить вибрационные микроускорения на борту МКС в условиях, которые наиболее благоприятны для проведения космических экспериментов в области микрогравитации. Представление об отобранных данных дают верхние графики на рис. 1 – 6 с индексами «а». Это – графики компонент  $a_x$ ,  $a_y$  и  $a_z$  кажущихся ускорений на отрезках 2, 5. Отрезок 2 приведен целиком, в случае отрезка 5 приведены его первые 500 значений. Данные на остальных отрезках выглядят примерно также.

Исследование каждого отрезка данных осуществлялось в два этапа. На первом этапе изучался дискретный спектр, на втором – непрерывный. Колебания с дискретным спектром представимы в виде суммы нескольких гармоник – циклических трендов – с несоизмеримыми в общем случае частотами. Изучение дискретного спектра сводилось к поиску таких гармоник. На втором этапе из исходных данных измерений вычитались найденные в них циклические тренды, в полученном ряде остатков выделялись некоторые составляющие, которые затем аппроксимировались процессами авторегрессии. Эти процессы служили для описания непрерывного спектра.

**3. Исследование дискретного спектра.** Поиск циклических трендов в исходных данных выполнялся по следующей схеме. Пусть  $a_n = a(t_n)$ ,  $t_n = nh$ , ( $h > 0$ ;  $n = 0, 1, \dots, N$ ) – данные измерений одной из компонент микроускорения. Попытаемся аппроксимировать функцию  $a(t)$  на отрезке  $0 \leq t \leq Nh$  выражением

$$a_{\text{ap}}(t) = \alpha_0 + \alpha \cos 2\pi ft + \beta \sin 2\pi ft, \quad (1)$$

где  $\alpha_0$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $f$  – параметры,  $f > 0$ . Значения этих параметров будем искать методом наименьших квадратов. Составим выражение

$$\Psi = \sum_{l=0}^L [a_n - a_{\text{ap}}(nh)]^2 \quad (2)$$

и найдем его минимум по  $\alpha_0$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $f$ . Значения параметров в точке минимума обеспечивают искомую аппроксимацию. Функция  $\Psi = \Psi(\alpha_0, \alpha, \beta, f)$  имеет, как правило, много локальных минимумов, поэтому ее минимизация проводится поэтапно. Сначала в результате решения ряда одинаковых линейных задач наименьших квадратов вычисляются значения функции

$$\Psi_1(f) = \min_{\alpha_0, \alpha, \beta} \Psi(\alpha_0, \alpha, \beta, f)$$

в узлах достаточно мелкой равномерной сетки на отрезке  $0 \leq f \leq 1/2h$ , строится график этой функции. Затем перебором по сетке находятся приближенные значения точек минимума  $\Psi_1(f)$ . Абсциссы значимых (с достаточно

малыми ординатами) точек минимума, являются частотами искомым гармоник. Пусть описанным способом найдены частоты  $f_k$  ( $k = 1, 2, \dots, M$ ;  $M \ll N$ ). Отвечающее этим частотам аппроксимирующее выражение ищем в виде

$$a_{\text{ап}}(t) = \alpha_0 + \beta_0 t + \sum_{k=1}^M (\alpha_k \cos 2\pi f_k t + \beta_k \sin 2\pi f_k t), \quad (3)$$

где  $\alpha_k, \beta_k$  ( $k = 0, 1, \dots, M$ ) – постоянные параметры. Значения параметров находятся методом наименьших квадратов – из условия минимума функции, заданной соотношениями (2) и (3). Величина  $A_k = \sqrt{\alpha_k^2 + \beta_k^2}$  называется амплитудой гармоники с частотой  $f_k$ .

Чтобы проверить найденное решение простым способом, наряду с функцией  $\Psi_1(f)$  рассматривалась функция

$$I(f) = \left[ \sum_{n=0}^N (a_n - a_*) \cos 2\pi f n h \right]^2 + \left[ \sum_{n=0}^N (a_n - a_*) \sin 2\pi f n h \right]^2, \quad a_* = \frac{1}{N+1} \sum_{n=0}^N a_n,$$

называемая периодограммой Шустера [1]. Пусть исследуемая функция  $a(t)$  имеет вид (3) при  $\beta_0 = 0$ . Тогда  $\alpha_0 \approx a_*$  и периодограмма имеет локальные максимумы в точках  $f_k^* \approx f_k$ , причем  $\alpha_k^2 + \beta_k^2 \approx 4I(f_k^*)(N+1)^{-2}$  ( $k = 1, 2, \dots, M$ ). Точность выписанных соотношений увеличивается с ростом  $N$ . Таким образом, знание максимумов периодограммы позволяет получить оценки частот и амплитуд гармонических составляющих функции  $a(t)$ .

Вместо периодограммы  $I(f)$  удобно использовать функцию

$$A(f) = \frac{2}{N+1} \sqrt{I(f)}.$$

Эту функцию и ее график называют амплитудным спектром.

Исследуемые отрезки данных содержат значительное число гармоник. Ниже в соответствующих выражениях (3) учитываются все значимые гармоники (отвечающие локальным экстремумам функций  $\Psi_1(f)$ ,  $I(f)$  с резко выделяющимися значениями) и некоторые менее значимые.

Частоты и амплитуду циклических трендов, найденных в исследуемых отрезках данных, приведены в табл. 1 – 6. Каждая таблица содержит параметры трендов, найденных во всех отрезках данных, которые отвечают данной компоненте микроускорения, измеренной данным акселерометром. Верхние строки таблиц содержат номера отрезков. Каждому отрезку отвечают два столбца – столбец частот  $f$  и столбец амплитуд  $A$ . Частоты измеряются в герцах; единицей измерения амплитуд в табл. 1 – 3, составленных для данных измерений MAMS, служит  $10^{-6} \text{ м/с}^2$ , в табл. 4 – 6, характеризующих данные SAMS, единица измерения амплитуд –  $10^{-3} \text{ м/с}^2$ . Параметры трендов, обнаруженных в

разных отрезках данных и имеющих примерно одинаковые частоты, помещены в таблицах в одну и ту же горизонтальную строку. Такая организация таблиц предполагает, что примерно одинаковые частоты, проявляющиеся в разных отрезках, – результат воздействия одного и того же реального фактора. Небольшие вариации частот, превышающие погрешности, обусловленные ограниченностью длины отрезков данных, могут быть объяснены нестабильностью функционирования бортового оборудования.

Амплитудные спектры, вычисленные для данных измерений MAMS, приведены в верхней части рис. 1б, 2б и 3б. Средние графики на этих рисунках суть спектры рядов данных с удаленными основными циклическими трендами. Как уже отмечалось, заметные возмущения в спектре данных измерений MAMS имеют частоты менее 2 Гц, поэтому спектры построены на отрезке  $0 \leq f \leq 2$  Гц. Аналогичные графики для данных измерений SAMS приведены в верхних и средних частях рис. 4б, 5б и 6б.

Поиск гармонических составляющих в данных измерений является коварной задачей. Гармоники с малыми амплитудами могут порождаться случайными ошибками в данных [1]. Для гармоник с большими амплитудами таких сомнений не возникает. В рассматриваемой задаче в случае данных измерений MAMS можно быть достаточно уверенными в существовании гармоник с амплитудами более  $2 \cdot 10^{-7}$  м/с<sup>2</sup>, в случае данных SAMS –  $2 \cdot 10^{-5}$  м/с<sup>2</sup>.

Анализ показывает, что многие значимые максимумы периодограмм исходных рядов измерений (например, максимумы в частотных диапазонах, включающих значения 0.4 и 0.7 Гц), принадлежат непрерывному спектру. Так, на рис. 1б, 2б, ..., 6б видно, что полностью удалить соответствующие пики на графиках не удалось. Однако после удаления циклического тренда во многих случаях достигалось заметное уменьшение этих максимумов и среднеквадратического значения ряда данных измерений.

Возникает естественный вопрос, законно ли в описанной ситуации выделение циклических трендов. По-видимому, законно, поскольку в данном случае, скорее всего, приходится иметь дело со смешанным спектром. Какое-то устройство создает гармонические колебания заданной частоты. Расположенные вблизи этого устройства элементы конструкции станции и бортового оборудования колеблются с той же или близкой частотой, следовательно, данные измерений акселерометра, полученные во время работы этого устройства, должны иметь соответствующий циклический тренд. Однако из-за резонансов могут возбуждаться и моды с близкими частотами. Кроме того, колебания, создаваемые устройством-возбудителем, могут иметь нестабильную частоту и т. п. Указанные обстоятельства приводят к “размыванию” частоты и появлению в измерениях компоненты с непрерывным спектром.

Рассмотрим данные измерений MAMS. Наиболее значимые колебания в выбранных отрезках данных имеют частоты в диапазонах  $0.076 \div 0.081$ ,  $0.398 \div 0.485$ ,  $0.693 \div 0.771$ ,  $1.61 \div 1.66$  Гц. У компонент  $a_x$  и  $a_y$  на всех трех отрезках в амплитудных спектрах доминируют пики с частотой 0.398 Гц. В слу-

чае компоненты  $a_x$  этот пик является основным – остальные пики амплитудного спектра намного меньше. В случае компоненты  $a_y$  в спектрах отрезков 1 и 2 имеются также пики в диапазоне частот  $0.757 \div 0.771$  Гц, а в спектре отрезка 3 – пик на частоте 1.66 Гц, причем высота последнего пика превышает высоты пиков в диапазоне  $0.757 \div 0.771$  Гц. В спектрах компоненты  $a_z$ , помимо возмущений в диапазонах  $0.410 \div 0.485$  и  $0.693 \div 0.744$  Гц, присутствуют также возмущения в диапазоне  $0.076 \div 0.081$  Гц (отрезки 1, 3). Отметим интересный факт. Возмущения на частоте 0.398 Гц доминируют в спектрах компонент  $a_x$  и  $a_y$ , но в спектрах компоненты  $a_z$  возмущение с близкой частотой наблюдается только на отрезке 2, при этом его основной пик приходится на частоту 0.410 Гц; в случае же отрезков 2 и 3 возмущения наблюдаются на частотах 0.485 и 0.474 соответственно. Данный эффект наблюдался ранее [2, 3]. Возможно, он проявляется систематически и вызван особенностями конструкции МКС. Некоторые отличия в наборах частот, найденных в [2] и в данной работе, можно объяснить тем, что для описываемого исследования были выбраны более спокойные участки полета, на которых амплитуда колебаний конструкции станции была заметно меньше. В [3] показано, что частоты в диапазонах  $0.076 \div 0.081$ ,  $0.398 \div 0.485$ ,  $0.693 \div 0.771$ ,  $1.61 \div 1.66$  Гц являются характерными частотами упругих колебаний конструкции станции. Возмущения с остальными выявленными частотами вызваны, по-видимому, работой бортового оборудования.

Перейдем к данным измерений SAMS. Здесь наиболее значимые возмущения наблюдаются в диапазонах частот  $57.37 \div 57.58$  и  $102.2 \div 105.3$  Гц. Возмущения в диапазоне частот  $57.37 \div 57.58$  присутствуют в спектрах всех составляющих на всех отрезках. На отрезках 2 и 3 наблюдаются значительные возмущения в диапазоне частот  $102.2 \div 105.3$  Гц. При этом, если в случае составляющей  $a_z$  возмущение в диапазоне  $57.37 \div 57.58$  Гц является доминирующим, то в случае составляющей  $a_x$  возмущения на данной частоте и в диапазоне частот  $102.2 \div 105.3$  Гц сопоставимы по амплитуде. Также на некоторых отрезках выявлены значительно более слабые, но отчетливые возмущения в диапазонах частот  $48.63 \div 48.96$ ,  $97.29 \div 97.76$  Гц, причем возмущения проявляются в виде одиночных пиков, в отличие от обнаруженных наборов частот в диапазонах  $11.10 \div 11.49$  и  $23.50 \div 28.46$  Гц.

После удаления из исходных данных измерений большинства выявленных циклических трендов в спектрах, по-прежнему, остаются достаточно сильные колебания. Здесь, как и в случае данных MAMS, колебания на большинстве частот имеют смешанный спектр. Тем не менее, колебания с малыми амплитудами в диапазоне  $114.7 \div 115.2$  Гц имеют чисто дискретный спектр – при удалении соответствующих циклических трендов, пики на таких частотах полностью исчезают. В измерениях компонент  $a_x$  и  $a_z$  отрезка 4 удалось выделить чистую гармонику с частотой 86.4 Гц.

**4. Исследование непрерывного спектра.** Ряд остатков, полученный удалением циклических трендов из исходных данных, содержит, в основном,

колебания с непрерывным спектром. Такие колебания возникают, по-видимому, вследствие разного рода случайных воздействий на нежесткий корпус станции. Представляет интерес найти математические модели, адекватно описывающие микроускорения с непрерывным спектром. С этой целью из ряда остатков выделялись составляющие, имеющие достаточно узкий спектр, и эти составляющие аппроксимировались процессами авторегрессии.

Выбор составляющих с узким спектром осуществлялся так. Сначала сравнивались спектры исходного ряда данных измерений и ряда остатков, полученного удалением циклических трендов. Как правило, каждому значимому экстремуму функций  $\Psi_1(f)$  и  $I(f)$  (они практически совпадали) исходного ряда отвечали несколько близких экстремумов аналогичных функций ряда остатков. Выбирался по возможности узкий диапазон частот  $f_1 \leq f \leq f_2$ , содержащий эти несколько экстремумов, и из ряда остатков выделялась составляющая, спектр которой располагался внутри указанного диапазона. А именно, ряд остатков подвергался дискретному преобразованию Фурье, члены преобразованного ряда, отвечающие частотам вне диапазона  $f_1 \leq f \leq f_2$ , заменялись нулями, и полученный в результате ряд подвергался обратному преобразованию Фурье.

Приведенные выше слова «по возможности узкий диапазон» означают, в частности, следующее. Граничные значения  $f_1$  и  $f_2$  выбирались таким образом, чтобы величины  $\Psi_1(f_1)$ ,  $\Psi_1(f_2)$  и  $I(f_1)$ ,  $I(f_2)$  находились на уровне фоновых (преобладающих) значений функций  $\Psi_1(f)$  и  $I(f)$ .

Приведем некоторые сведения о процессах авторегрессии. Рассмотрим временной ряд  $\xi_n = \xi(t_n)$ ,  $t_n = nh$ , где индекс  $n$  принимает любые целые значения. Этот временной ряд называется процессом авторегрессии порядка  $p$  (обозначается  $AR(p)$ ), если его члены удовлетворяют соотношению

$$\xi_n = b_1 \xi_{n-1} + b_2 \xi_{n-2} + \dots + b_p \xi_{n-p} + \varepsilon_n. \quad (4)$$

Здесь  $b_m$  ( $m = 1, 2, \dots, p$ ) – постоянные коэффициенты,  $\varepsilon_n$  – независимые случайные величины, имеющие одинаковое распределение и нулевое среднее значение.

Рассмотрим применение процесса  $AR(p)$  для моделирования временных рядов. Если известны значения процесса при  $n = 0, 1, \dots, N$ , то оценки коэффициентов  $b_k$  можно найти методом наименьших квадратов – из условия минимума выражения

$$\sum_{n=p}^N (\xi_n - b_1 \xi_{n-1} - \dots - b_n \xi_{n-p})^2.$$

Соответствующие нормальные уравнения называются уравнениями Юла – Уокера [4]. Решение этих уравнений обозначим  $b_m(p)$ . Если порядок  $p$  процесса заранее неизвестен, то его обычно определяют исходя из принципа экономии – модель должна быть не только адекватной, но и простой. Иными сло-

вами, необходимо подобрать модель (4), имеющую минимальное количество параметров, которая бы удовлетворяла при этом некоторым условиям оптимальности [1, 4].

Часто используется введенное Акаике условие минимальности так называемой окончательной ошибки предсказания FPE (Final Prediction Error). Для случая, когда среднее значение исследуемого ряда не было удалено перед оценкой параметров  $AP(p)$ , окончательная ошибка предсказания определяется формулой [4]

$$FPE(p) = \frac{N+p}{N-p} \sum_{n=p}^N \left( \xi_n - \sum_{m=1}^p b_m(p) \xi_{n-m} \right)^2.$$

Функция  $FPE(p)$  вычисляется для всех приемлемых значений  $p \in [1, N-1]$ , затем из них выбирается такое  $p_A$ , что число  $FPE(p_A)$  достаточно мало и при  $p \geq p_A$  функция  $FPE(p)$  меняется незначительно. Число  $p_A$  принимается в качестве искомого порядка авторегрессионного процесса. В описываемом исследовании вычисления  $FPE(p)$  проводились для  $p$  в пределах от 1 до 10.

Берг предложил другую формулу ошибки предсказания [5]

$$PE(p) = \frac{1}{2(N-p)} \sum_{n=p+1}^N \left\{ \left( \xi_n - \sum_{m=1}^p b_m(p) \xi_{n-m} \right)^2 + \left( \xi_{n-p} - \sum_{m=1}^p b_m(p) \xi_{n-p+m} \right)^2 \right\}.$$

Функция  $PE(p)$  быстро возрастает, если порядок  $AP$  процесса переоценен. Как и в предыдущем случае, функция  $PE(p)$  вычислялась при  $1 \leq p \leq 10$ . Число  $p_B$ , для которого величина  $PE(p_B)$  достаточно мала и при  $p \geq p_B$  функция  $PE(p)$  быстро возрастает, следует принять в качестве порядка модели (4).

Правило Акаике обычно дает заниженное значение порядка авторегрессионного процесса. Правило Берга оказывается корректным именно в случае процессов авторегрессии и приводит к переоценке порядка смешанных процессов, включающих скользящее среднее. Одновременное использование этих двух правил позволяет достаточно точно определить оптимальный порядок изучаемого процесса.

Для исследования  $AP$  процессов выбирались отрезки рядов данных, которые выглядели стационарными. Как известно, процесс  $AP(p)$  стационарен, если корни его характеристического уравнения

$$\lambda^p - b_1 \lambda^{p-1} - b_2 \lambda^{p-2} - \dots - b_p = 0 \quad (7)$$

удовлетворяют неравенству  $|\lambda| < 1$ . Этот факт позволяет, в частности, проверить правильность определения коэффициентов  $b_m(p)$  с помощью уравнений Юла-Уокера. При изучении колебаний механических систем наибольший интерес представляют процессы  $AP(2)$ . Если корни характеристического уравнения

такого процесса – комплексные и лежат в единичном круге  $|\lambda| < 1$ , то процесс представляет собой затухающие колебания, поддерживаемые случайными возмущениями. В этом случае удобно использовать параметры [1, 4]

$$d = -\frac{1}{2h} \ln(-b_2), \quad f = \frac{1}{2\pi h} \arccos\left(\frac{b_1}{2\sqrt{-b_2}}\right), \quad P = \frac{\sigma_r}{\sigma_0},$$

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^N \xi_n^2}, \quad \sigma_r = \sqrt{\frac{1}{N-2p} \sum_{n=p}^N \left(\xi_n - \sum_{m=1}^p b_m(p) \xi_{n-m}\right)^2}. \quad (8)$$

Здесь  $d$  – коэффициент затухания,  $f$  – частота затухающих колебаний,  $\sigma_0$  и  $\sigma_r$  – среднеквадратичные значения исходного временного ряда и ряда остатков соответственно,  $P$  – коэффициент, характеризующий уменьшение среднеквадратичного значения сигнала после удаления из исследуемого временного ряда найденного процесса AP(2).

Практически все значимые колебания, принадлежащие исследуемым в данной работе отрезкам  $[f_1, f_2]$  непрерывного спектра, могут быть описаны процессами AP(2). С учетом этого обстоятельства в тех спорных случаях, когда, согласно приведенным выше критериям, можно было выбрать второй или более высокий порядок AP процесса, выбирался второй порядок. Иными словами, предпочтение отдавалось возможности описания исследуемых отрезков спектра одночастотными затухающими колебаниями.

Результаты второго этапа исследования колебаний в измерениях MAMS на выбранных отрезках данных приведены в табл. 7 – 15. Таблицы устроены следующим образом. В их первом столбце указан выделенный для анализа участок спектра. Для каждого такого участка в столбцах 2 – 6 приведены параметры (8) и корни характеристического уравнения соответствующего процесса AP(2). Для корней указаны действительные и мнимые части, частоты выражены в Гц, единицы измерения остальных величин:  $[\sigma_0] = 10^{-7} \text{ м/с}^2$ ,  $[\sigma_r] = 10^{-10} \text{ м/с}^2$ ,  $[P] = 10^{-4}$ ,  $[d] = 10^{-3}$ .

Табл. 16 – 24 содержат результаты второго этапа исследования колебаний в выбранных отрезках данных измерений SAMS. Таблицы устроены аналогично табл. 7 – 15 и отличаются только единицами измерения приводимых величин. В табл. 16 – 24 эти единицы следующие:  $[\sigma_0] = 10^{-4} \text{ м/с}^2$ ,  $[\sigma_r] = 10^{-7} \text{ м/с}^2$ ,  $[P] = 10^{-4}$ ,  $[d] = 1$ .

В табл. 25 и 26 приведены среднеквадратичные значения сигнала после выполнения первого и второго этапов исследования для всех выбранных отрезков данных измерений обоих акселерометров. Единицей измерения среднеквадратичных значений сигнала для данных MAMS (табл. 25) служит  $10^{-6} \text{ м/с}^2$ , для данных SAMS (табл. 26) –  $10^{-2} \text{ м/с}^2$ . В таблицах приведены также отноше-

ния среднеквадратичного значения сигнала, полученного на первом этапе, к среднеквадратичному значению сигнала на втором этапе. Квадрат этого отношения характеризуют соответствующее уменьшение мощности сигнала. Из анализа табл. 25, 26 следует, что в результате удаления колебаний, отвечающих непрерывному спектру, среднеквадратичное значение сигнала на рассматриваемых отрезках данных уменьшается от 1.3 до 2.8 раз.

Все исследованные процессы  $AP(2)$  имеют параметры, находящиеся в области стационарности вблизи ее границы – корни характеристических уравнений этих процессов лежат внутри единичного круга, но коэффициент затухания процессов очень мал. Расширение исследуемого отрезка спектра  $f_1 \leq f \leq f_2$  приводит к увеличению коэффициента затухания и смещению корней характеристического уравнения внутрь единичного круга.

Подведем итоги. На втором этапе исследования были выявлены наиболее значимые колебания, оставшиеся после удаления циклических трендов. Были определены параметры процессов авторегрессии, аппроксимирующих эти колебания. Как уже отмечалось, все рассмотренные колебания достаточно точно описываются процессами авторегрессии второго порядка. Наиболее значимые колебания непрерывного спектра имеют место в частотных диапазонах, представляющих собой окрестности частот ранее выделенных циклических трендов. Спектры рядов остатков, полученных после удаления найденных процессов авторегрессии, все еще сохраняют в указанных диапазонах довольно заметные пики.

Таким образом, большинство выявленных значимых колебаний в данных измерений акселерометров MAMS и SAMS имеют смешанный – дискретный и непрерывный спектр. Выявленные возмущения вызваны, в основном, колебаниями крупногабаритных элементов конструкции станции – многие найденные частоты являются характерными частотами упругих колебаний конструкции МКС [3]. По-видимому, все колебания со смешанным спектром можно связать с упругими колебаниями конструкции станции. Колебания с чисто дискретным спектром следует связать с функционированием бортового оборудования. Все такие колебания имеют малые амплитуды.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (08-01-00467).

## Литература

1. Теребиж В.Ю. Анализ временных рядов в астрофизике. М.: Наука, 1992.
2. Завалишин Д.А., Беляев М.Ю., Сазонов В.В. Оценка динамических характеристик Международной космической станции по измерениям микроускорений. Космические исследования, 2009, т. 47, № 2, с. 193-203.
3. Завалишин Д.А., Беляев М.Ю., Сазонов В.В. Определение характерных частот упругих колебаний конструкции МКС. Препринт Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, № 86, 2008; Космические исследования, 2010, т. 48, № 4, с. 362-370.
4. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. Выпуск 1. М.: Мир, 1974.
5. Ulrich T.J., Bishop T.N. Maximum Entropy Spectral Analysis and Autoregressive Decomposition. Reviews of geophysics and space physics, 1975, vol. 12, No. 1, p. 183-200.

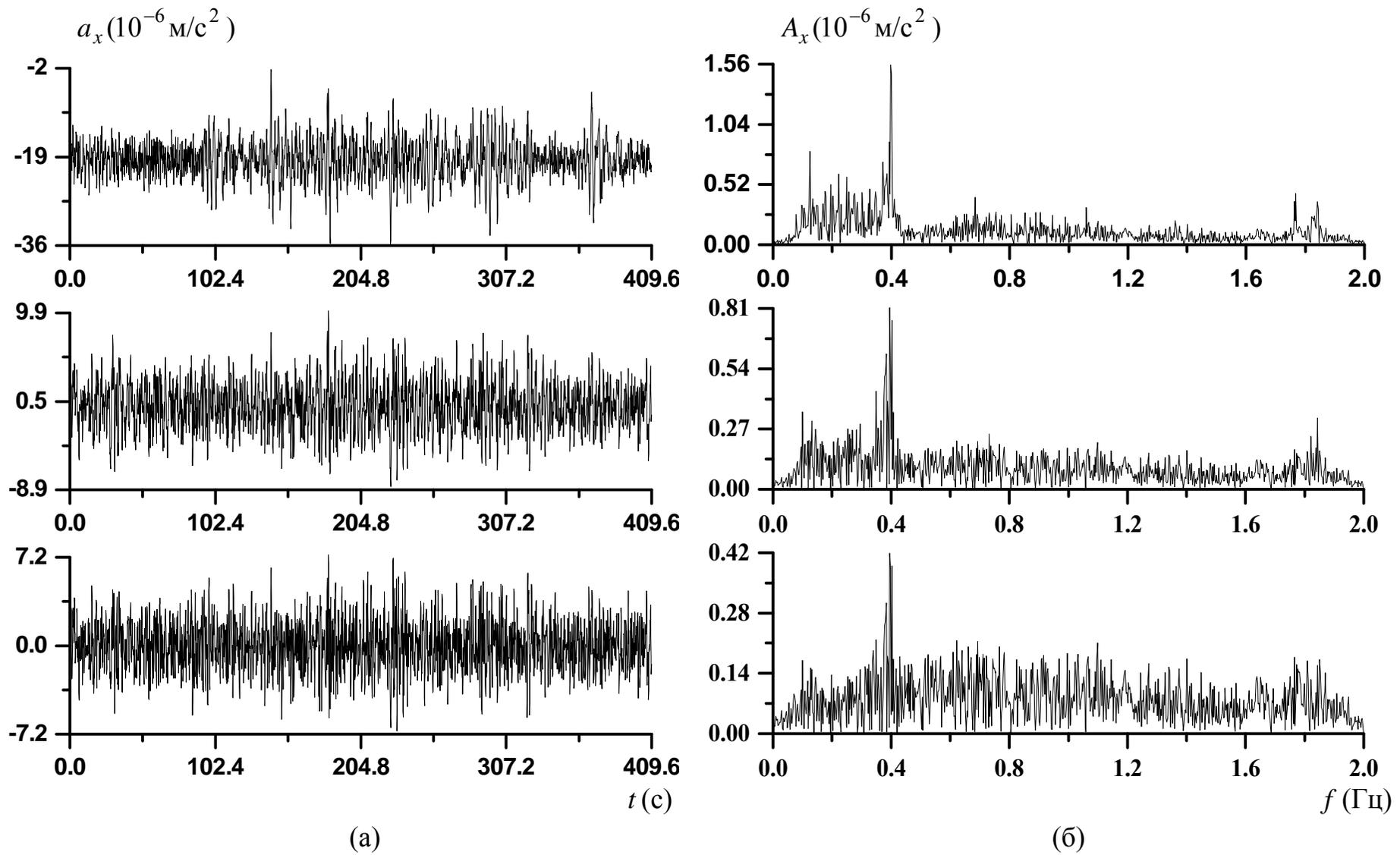


Рис. 1. Отрезок 2 (MAMS): (а) компонента ускорения  $a_x$ ; (б) спектральный анализ компоненты  $a_x$ .

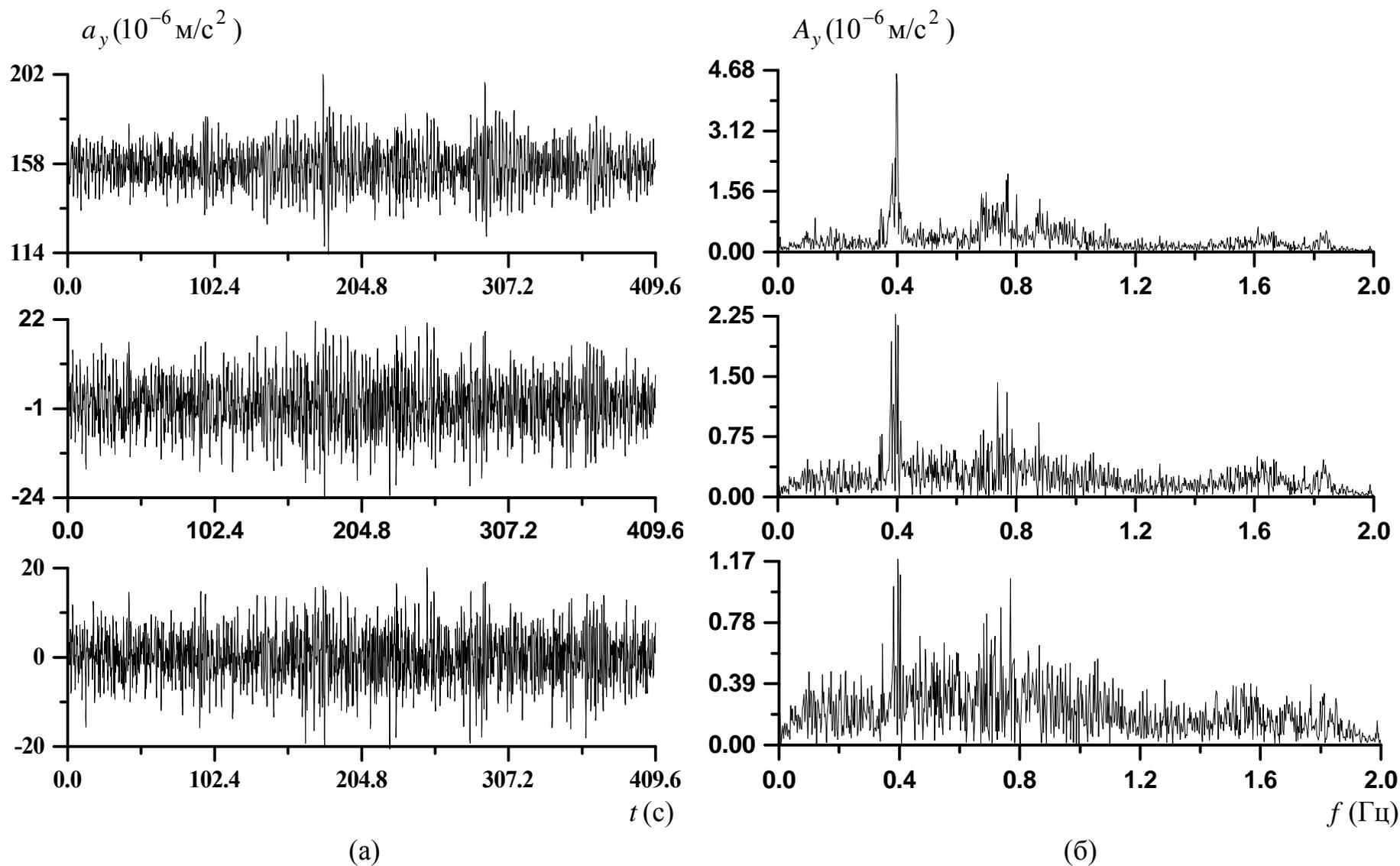


Рис. 2. Отрезок 2 (MAMS): (а) компонента ускорения  $a_y$ ; (б) спектральный анализ компоненты  $a_y$ .

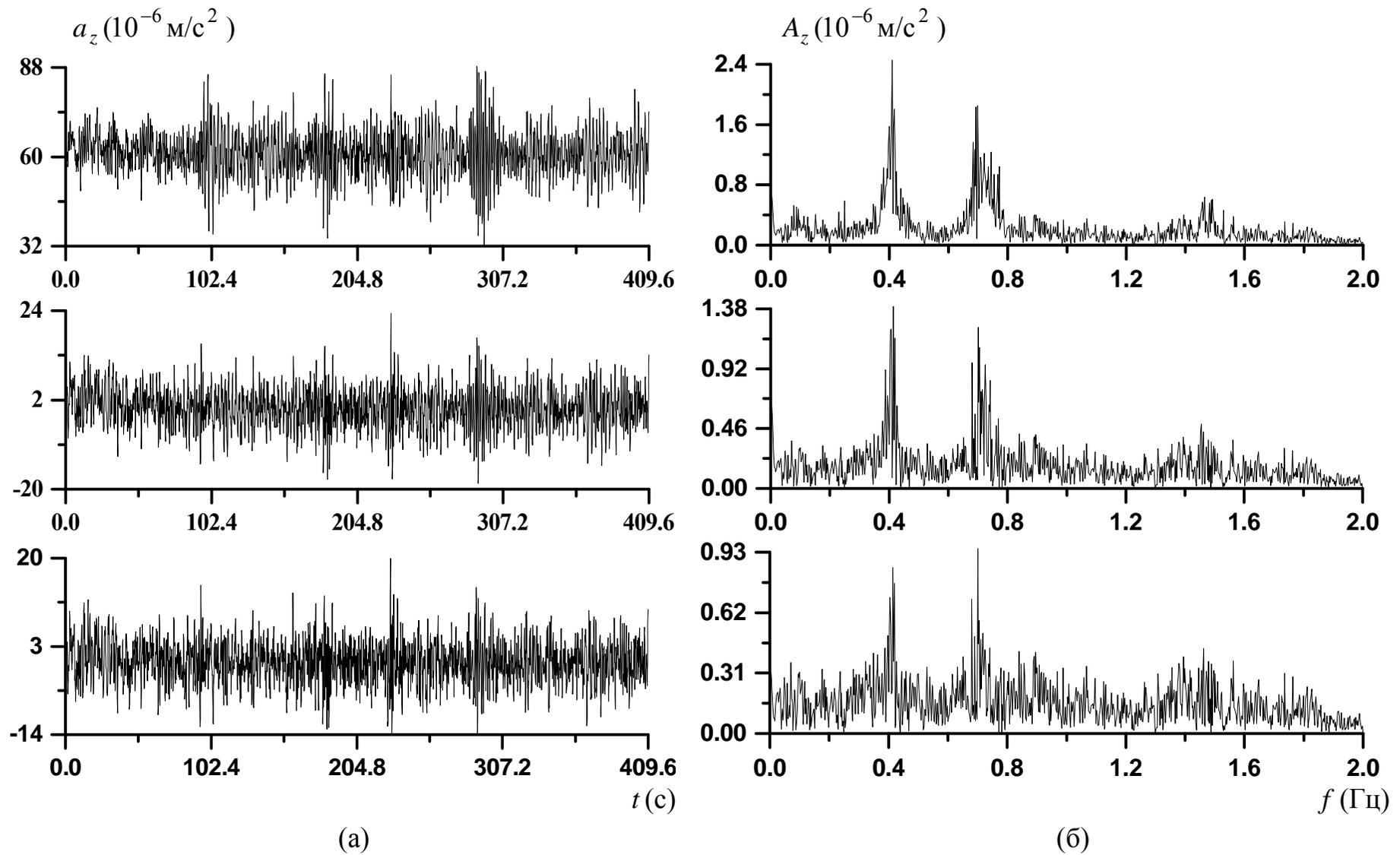


Рис. 3. Отрезок 2 (MAMS): (а) компонента ускорения  $a_z$ ; (б) спектральный анализ компоненты  $a_z$ .

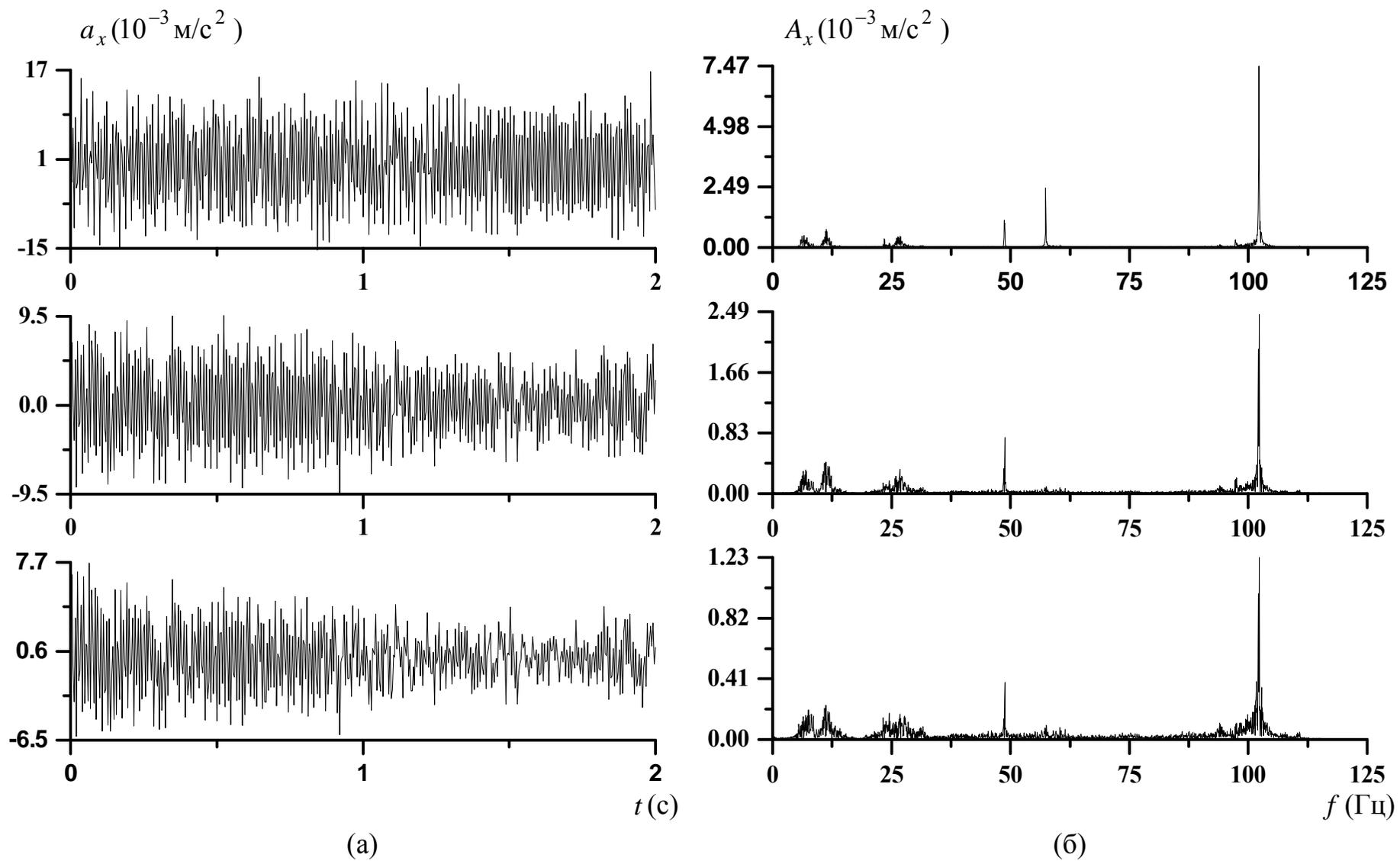


Рис. 4. Отрезок 5 (SAMS): (а) компонента ускорения  $a_x$ ; (б) спектральный анализ компоненты  $a_x$ .

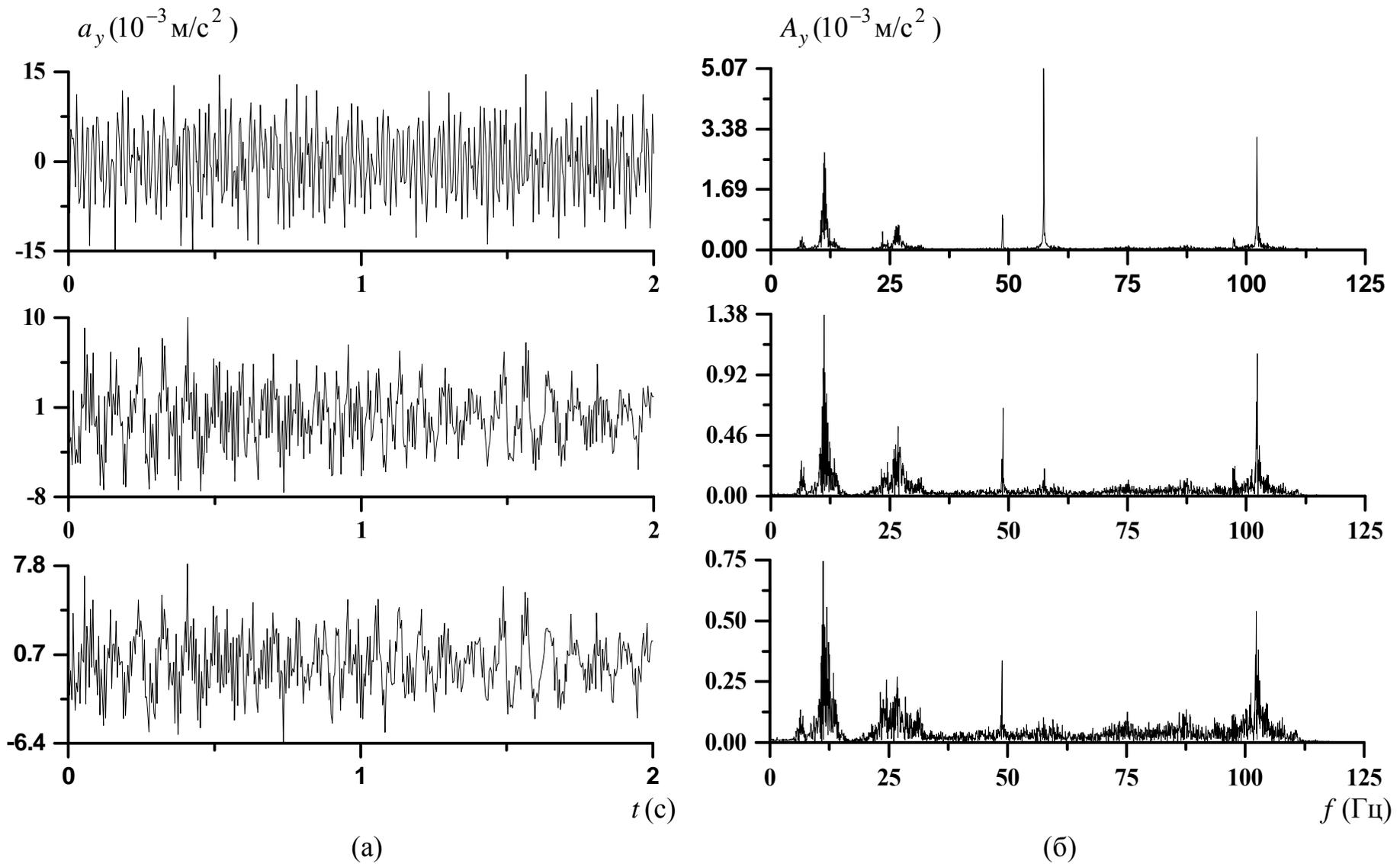


Рис. 5. Отрезок 5 (SAMS): (а) компонента ускорения  $a_y$ ; (б) спектральный анализ компоненты  $a_y$ .

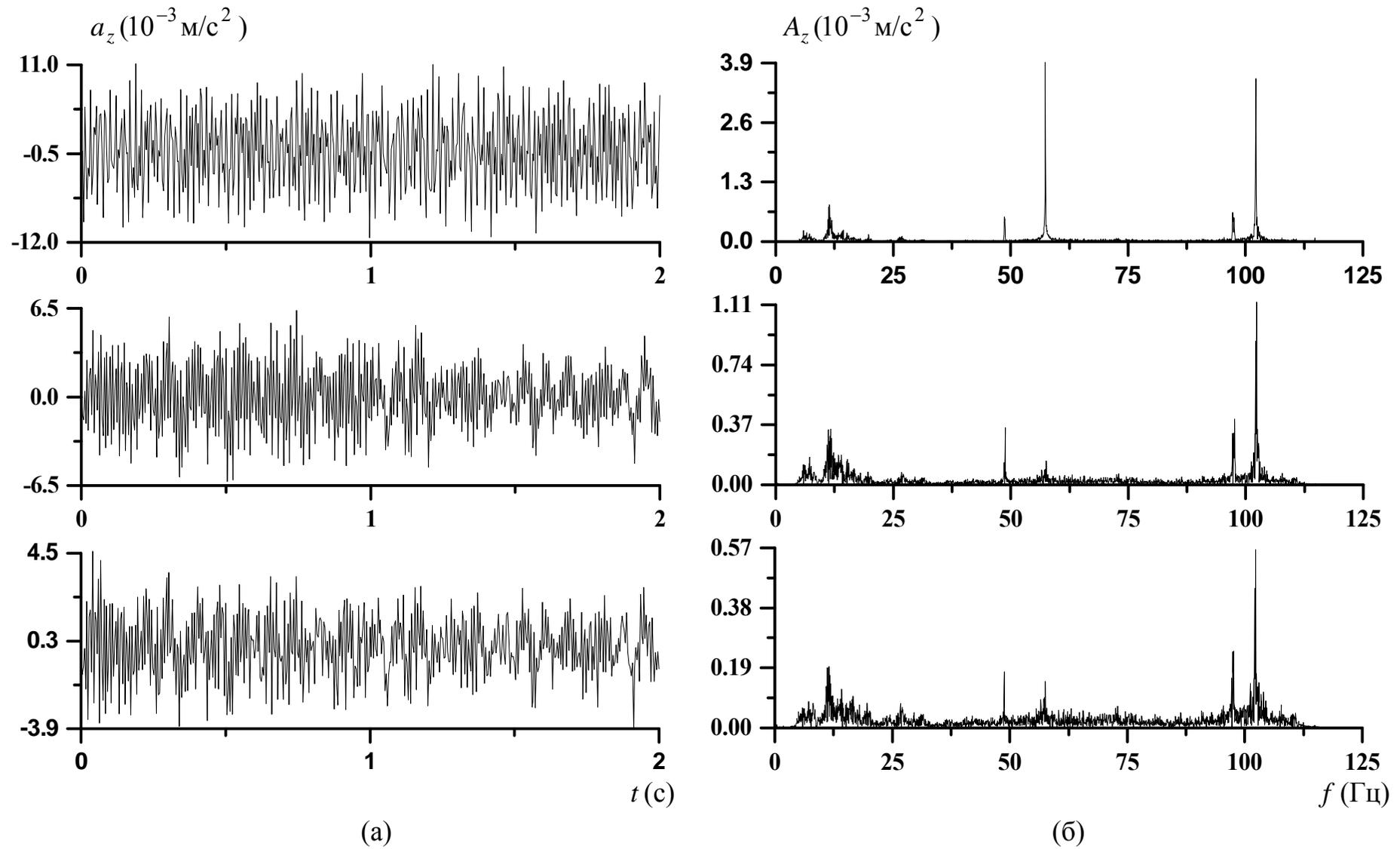


Рис. 6. Отрезок 5 (SAMS): (а) компонента ускорения  $a_z$ ; (б) спектральный анализ компоненты  $a_z$ .

**Таблица 1. Гармонические составляющие в данных измерений компоненты ускорения  $a_x$  акселерометром MAMS;  $[f] = \text{Гц}$ ,  $[A] = 10^{-6} \text{ м/с}^2$**

Отрезок 1		Отрезок 2		Отрезок 3	
$f$	$A$	$f$	$A$	$f$	$A$
0.078	0.39	0.078	0.26	0.078	0.90
0.091	0.33	0.098	0.32	0.098	0.66
0.102	0.38	0.106	0.33	0.104	0.38
0.122	0.23	0.124	0.82	0.124	1.28
0.138	0.25	0.135	0.39	0.137	0.34
-		-		0.144	0.64
0.153	0.25	0.150	0.49	0.150	0.94
-		0.169	0.39	0.169	0.60
0.176	0.14	0.177	0.59	0.176	0.92
-		0.195	0.57	0.193	0.65
0.200	0.30	0.202	0.42	0.203	0.76
-		0.222	0.62	0.222	0.87
-		0.249	0.57	0.247	1.03
-		0.256	0.44	0.259	0.52
-		0.275	0.49	0.273	0.73
-		-		0.295	0.84
0.302	0.20	0.301	0.55	0.301	1.04
0.328	0.21	0.327	0.46	0.327	1.29
-		0.346	0.52	0.343	0.93
0.365	0.43	-		0.369	1.47
0.372	0.26	0.372	0.79	0.376	1.06

Отрезок 1		Отрезок 2		Отрезок 3	
$f$	$A$	$f$	$A$	$f$	$A$
0.383	0.41	0.386	0.66	-	
0.392	0.67	0.393	1.04	0.390	1.84
0.398	1.76	0.399	1.86	0.398	2.28
0.405	0.81	-		-	
0.412	0.75	0.414	0.36	0.417	0.75
0.683	0.42	0.684	0.42	0.681	0.50
0.716	0.28	-		0.715	0.48
-		0.720	0.27	0.720	0.51
-		0.730	0.28	-	
0.739	0.21	-		0.737	0.50
-		-		1.025	0.44
-		-		1.047	0.49
-		-		1.643	0.69
-		-		1.660	0.95
-		-		1.666	0.77
-		-		1.677	0.70
1.708	0.40	-		-	
-		1.763	0.41	-	
-		1.768	0.46	1.767	0.65
-		1.840	0.40	1.847	0.54

**Таблица 2. Гармонические составляющие в данных измерений компоненты ускорения  $a_y$**

**акселерометром MAMS;  $[f] = \text{Гц}$ ,  $[A] = 10^{-6} \text{ м/с}^2$**

Отрезок 1		Отрезок 2		Отрезок 3	
$f$	$A$	$f$	$A$	$f$	$A$
-		-		0.017	1.71
-		-		0.033	1.80
0.078	0.67	-		0.077	1.34
0.087	1.02	0.086	0.42	0.084	1.48
0.096	0.76	0.096	0.68	-	
-		0.124	0.86	-	
-		-		0.330	2.13
0.351	1.18	0.345	1.13	0.346	2.44
-		0.372	1.25	0.369	2.63
0.374	0.70	-		0.376	3.26
0.383	1.28	0.383	2.82	0.385	2.07
-		0.393	2.86	0.390	4.78
0.398	3.52	0.399	5.78	0.398	7.98
0.405	1.72	0.408	1.59	-	
0.411	1.59	-		-	
0.422	0.96	0.425	0.88	0.425	2.67
0.438	0.66	-		0.431	2.39
0.476	0.61	-		0.474	1.22
0.527	0.60	-		0.525	1.11
-		0.683	1.65	-	
0.690	0.86	0.688	1.68	-	

Отрезок 1		Отрезок 2		Отрезок 3	
$f$	$A$	$f$	$A$	$f$	$A$
-		0.693	1.32	-	
-		0.699	1.68	0.696	1.29
0.705	0.97	0.708	1.13	-	
0.712	0.97	-		0.714	1.38
0.720	1.29	0.720	1.31	0.721	2.19
0.730	2.03	0.735	1.41	0.733	2.14
0.738	1.08	-		0.738	3.53
0.743	0.78	0.742	1.06	0.744	4.23
0.748	0.75	0.749	1.48	-	
0.756	0.83	0.758	1.77	0.755	1.74
0.764	0.74	0.767	2.11	0.767	2.14
-		0.771	2.21	-	
-		0.801	1.47	-	
0.847	0.56	-		-	
-		0.868	1.10	-	
-		0.880	1.36	-	
-		1.648	0.50	1.643	3.34
-		1.658	0.50	1.660	3.86
-		-		1.666	3.33
1.712	0.73	-		-	
1.721	0.76	-		-	

**Таблица 3. Гармонические составляющие в данных измерений компоненты ускорения  $a_z$**

**акселерометром MAMS;  $[f] = \text{Гц}$ ,  $[A] = 10^{-6} \text{ м/с}^2$**

Отрезок 1		Отрезок 2		Отрезок 3	
$f$	$A$	$f$	$A$	$f$	$A$
0.074	0.47	0.078	0.56	0.076	1.54
0.085	1.09	0.088	0.51	0.085	1.06
-		0.093	0.56	-	
0.101	0.92	-		-	
-		0.125	0.41	0.124	0.87
0.359	0.34	0.353	0.60	-	
0.373	0.36	0.373	1.05	-	
0.393	0.40	0.392	1.37	-	
-		0.399	2.10	-	
-		0.410	2.28	-	
0.419	0.36	0.417	2.13	-	
-		0.424	1.44	-	
0.438	0.59	0.439	0.73	-	
0.463	0.59	0.462	0.62	-	
0.472	0.46	-		0.474	2.08
0.484	1.10	-		0.480	1.39
0.490	0.43	-		0.493	0.95
0.505	0.61	-		0.500	0.90
-		0.677	1.01	0.676	1.11
0.683	0.70	0.683	1.46	-	
0.694	0.48	0.693	2.27	-	
-		0.699	1.90	-	
0.707	0.82	0.709	1.30	-	
0.719	0.58	0.719	1.37	0.719	1.22

Отрезок 1		Отрезок 2		Отрезок 3	
$f$	$A$	$f$	$A$	$f$	$A$
0.727	1.52	-		0.727	2.05
-		0.734	1.24	0.735	1.07
0.740	0.78	0.745	1.22	0.744	4.08
0.750	1.27	0.750	0.78	0.748	3.94
0.756	0.95	0.754	1.15	0.756	1.57
0.761	0.80	0.766	1.08	0.762	1.21
0.772	0.41	0.771	0.95	0.769	3.02
0.784	0.38	0.785	0.62	0.786	1.07
0.878	0.82	-		-	
0.974	0.66	-		-	
0.985	0.54	-		-	
-		1.465	0.68	1.462	0.87
-		1.492	0.65	1.498	1.15
1.501	0.41	-		1.508	1.48
-		1.528	0.47	1.525	1.01
-		-		1.549	1.62
-		-		1.572	2.04
-		-		1.590	1.91
-		-		1.599	1.52
-		-		1.606	2.30
-		-		1.623	1.76
-		-		1.640	1.64
-		-		1.656	1.53
-		-		1.673	1.68

Гармонические составляющие в данных измерений акселерометра SAMS;  $[f] = \text{Гц}$ ,  $[A] = 10^{-3} \text{ м/с}^2$

Таблица 4. Компонента  $a_x$

Отрезок 4		Отрезок 5		Отрезок 6	
$f$	$A$	$f$	$A$	$f$	$A$
-		11.104	0.52	-	
-		11.278	0.81	-	
-		11.480	0.82	-	
48.629	0.50	48.638	0.46	48.701	0.52
48.955	0.33	48.744	0.57	48.844	0.47
57.370	4.21	57.393	4.68	57.580	4.81
97.258	0.65	97.384	0.66	97.411	0.74
-		97.536	0.57	97.540	0.51
105.302	4.80	102.214	4.25	-	

Таблица 5. Компонента  $a_y$

Отрезок 4		Отрезок 5		Отрезок 6	
$f$	$A$	$f$	$A$	$f$	$A$
-		11.106	2.56	-	
-		11.279	2.79	-	
-		11.485	2.25	-	
26.366	0.36	26.384	0.79	-	
26.763	0.49	26.794	0.69	-	
28.461	0.78	-		-	
48.627	0.98	48.638	0.84	48.702	1.03
48.953	0.59	48.743	1.01	48.834	0.88
57.370	5.47	57.393	6.05	57.580	5.87
-		97.292	0.34	97.404	0.42
105.30	11.74	102.213	3.81	-	

Таблица 6. Компонента  $a_z$

Отрезок 4		Отрезок 5		Отрезок 6	
$f$	$A$	$f$	$A$	$f$	$A$
5.672	0.34	-		-	
6.118	0.26	6.159	0.44	-	
-		6.570	0.60	-	
7.034	0.25	7.222	0.49	-	
7.740	0.33	-		7.679	0.04
8.838	0.27	-		-	
-		11.104	0.73	-	
-		11.274	0.82	-	
-		11.490	0.70	-	
-		23.502	0.36	23.549	0.14
26.368	0.25	26.383	0.51	-	
26.762	0.34	26.794	0.45	-	
28.462	0.50	-		-	
48.627	1.10	48.639	0.95	48.701	1.19
48.955	0.66	48.741	1.17	48.836	1.01
57.370	2.84	57.393	2.92	57.580	2.77
84.770	0.46	-		-	
-		-		86.380	0.17
-		97.292	0.31	97.406	0.29
105.300	3.33	102.214	8.93	-	

**Таблица 7. Параметры процессов AP(2) в измерениях компоненты ускорения  $a_x$  акселерометром MAMS на отрезке 1**

$f_1 \div f_2$	$f$	$\sigma_0$	$\sigma_r$	$P$	$d$	$\text{Re}\lambda$	$\text{Im}\lambda$
0.062 ÷ 0.079	0.0691	0.83	0.19	2.26	0.053	0.999	0.043
0.079 ÷ 0.092	0.0859	0.54	0.08	1.42	0.018	0.999	0.054
0.092 ÷ 0.103	0.0962	1.06	0.18	1.71	0.020	0.998	0.060
0.103 ÷ 0.113	0.1078	0.77	0.09	1.23	0.013	0.998	0.068
0.123 ÷ 0.137	0.1297	1.08	0.39	3.62	0.048	0.997	0.081
0.137 ÷ 0.154	0.1464	1.02	0.60	5.86	0.092	0.996	0.092
0.198 ÷ 0.213	0.2038	1.56	0.88	5.64	0.046	0.992	0.128
0.359 ÷ 0.379	0.3684	2.15	2.63	12.25	0.072	0.973	0.229
0.379 ÷ 0.389	0.3817	1.13	0.58	5.11	0.010	0.971	0.238
0.389 ÷ 0.399	0.3948	2.63	1.23	4.67	0.088	0.969	0.246
0.399 ÷ 0.418	0.4058	3.22	4.11	12.76	0.074	0.968	0.252
0.686 ÷ 0.703	0.6910	1.67	3.61	21.58	0.064	0.907	0.421
1.700 ÷ 1.717	1.7091	1.13	4.48	39.74	0.052	0.477	0.879

**Таблица 8. Параметры процессов AP(2) в измерениях компоненты ускорения  $a_y$  акселерометром MAMS на отрезке 1**

$f_1 \div f_2$	$f$	$\sigma_0$	$\sigma_r$	$P$	$d$	$\text{Re}\lambda$	$\text{Im}\lambda$
0.078 ÷ 0.093	0.0852	2.70	0.55	2.04	0.052	0.999	0.054
0.217 ÷ 0.232	0.2258	2.79	2.12	7.60	0.075	0.990	0.141
0.342 ÷ 0.352	0.3477	3.14	1.72	5.49	0.021	0.976	0.217
0.352 ÷ 0.369	0.3596	4.82	7.17	14.87	0.012	0.975	0.224
0.388 ÷ 0.398	0.3938	8.00	5.17	6.46	0.173	0.970	0.245
0.398 ÷ 0.423	0.4118	7.85	14.05	17.90	0.128	0.967	0.256
0.711 ÷ 0.721	0.7129	2.94	4.77	16.22	0.051	0.901	0.433
0.721 ÷ 0.738	0.7276	5.50	6.76	12.29	0.025	0.897	0.441
1.712 ÷ 1.731	1.7211	3.52	20.54	58.28	0.121	0.470	0.883

**Таблица 9. Параметры процессов AP(2) в измерениях компоненты ускорения  $a_z$  акселерометром MAMS на отрезке 1**

$f_1 \div f_2$	$f$	$\sigma_0$	$\sigma_r$	$P$	$d$	$\text{Re}\lambda$	$\text{Im}\lambda$
0.086 ÷ 0.105	0.0970	1.64	0.32	1.98	0.031	0.998	0.061
0.457 ÷ 0.474	0.4639	2.04	3.35	16.41	0.080	0.958	0.287
0.476 ÷ 0.499	0.4862	3.51	7.39	21.06	0.112	0.954	0.301
0.506 ÷ 0.523	0.5104	3.00	3.96	13.22	0.051	0.949	0.315
0.684 ÷ 0.694	0.6883	2.48	2.79	11.25	0.015	0.908	0.419
0.694 ÷ 0.713	0.7033	4.01	5.63	14.04	0.026	0.904	0.428
0.713 ÷ 0.720	0.7159	1.62	1.18	7.25	0.007	0.901	0.435
0.720 ÷ 0.740	0.7284	4.59	11.02	24.01	0.090	0.897	0.442
0.740 ÷ 0.750	0.7440	3.04	2.37	7.80	0.008	0.893	0.451
0.750 ÷ 0.772	0.7571	3.45	11.11	32.20	0.122	0.889	0.458
0.972 ÷ 0.979	0.9764	2.26	0.99	4.36	0.002	0.818	0.576

**Таблица 10. Параметры процессов AP(2) в измерениях компоненты ускорения  $a_x$  акселерометром MAMS на отрезке 2**

$f_1 \div f_2$	$f$	$\sigma_0$	$\sigma_r$	$P$	$d$	$\text{Re}\lambda$	$\text{Im}\lambda$
0.079 ÷ 0.098	0.0897	1.10	0.44	3.98	0.125	0.998	0.056
0.105 ÷ 0.120	0.1121	1.29	0.47	3.68	0.048	0.998	0.070
0.120 ÷ 0.139	0.1281	1.77	0.87	4.93	0.081	0.997	0.080
0.140 ÷ 0.164	0.1498	1.78	1.48	8.33	0.169	0.996	0.094
0.164 ÷ 0.195	0.1773	1.71	2.15	12.59	0.318	0.994	0.111
0.203 ÷ 0.230	0.2159	1.72	1.99	11.54	0.185	0.991	0.135
0.230 ÷ 0.250	0.2408	1.60	1.50	9.35	0.089	0.989	0.151
0.250 ÷ 0.256	0.2536	1.04	0.17	1.62	0.004	0.987	0.159
0.256 ÷ 0.286	0.2714	2.25	4.08	18.14	0.309	0.985	0.170
0.286 ÷ 0.308	0.2957	1.57	1.56	9.96	0.079	0.983	0.185
0.347 ÷ 0.361	0.3522	2.11	2.29	10.89	0.071	0.976	0.220
0.362 ÷ 0.369	0.3660	1.21	0.38	3.11	0.006	0.974	0.228
0.369 ÷ 0.386	0.3800	3.73	3.44	9.22	0.039	0.972	0.236
0.386 ÷ 0.393	0.3889	1.80	0.60	3.36	0.009	0.970	0.242
0.393 ÷ 0.412	0.3998	4.60	5.49	11.94	0.058	0.969	0.249
0.420 ÷ 0.427	0.4228	0.92	0.31	3.32	0.005	0.965	0.263
0.730 ÷ 0.740	0.7344	1.16	1.56	13.41	0.023	0.895	0.445
1.835 ÷ 1.846	1.8416	1.39	4.19	30.12	0.024	0.402	0.916

**Таблица 11. Параметры процессов AP(2) в измерениях компоненты ускорения  $a_y$  акселерометром MAMS на отрезке 2**

$f_1 \div f_2$	$f$	$\sigma_0$	$\sigma_r$	$P$	$d$	$\text{Re}\lambda$	$\text{Im}\lambda$
0.337 ÷ 0.357	0.3475	4.31	4.80	11.12	0.068	0.976	0.217
0.372 ÷ 0.383	0.3794	8.45	5.30	6.27	0.016	0.972	0.236
0.385 ÷ 0.394	0.3879	6.88	3.78	5.49	0.019	0.970	0.241
0.394 ÷ 0.409	0.3990	12.02	12.65	10.54	0.045	0.969	0.248
0.409 ÷ 0.427	0.4149	5.15	7.63	14.83	0.078	0.966	0.258
0.730 ÷ 0.750	0.7390	5.31	11.29	21.26	0.047	0.894	0.448
0.750 ÷ 0.772	0.7607	5.68	21.00	36.98	0.152	0.888	0.460
0.784 ÷ 0.801	0.7903	4.45	11.42	25.64	0.079	0.879	0.476
0.872 ÷ 0.889	0.8796	4.43	12.20	27.52	0.068	0.851	0.525
1.611 ÷ 1.648	1.6289	4.12	37.53	91.12	0.283	0.520	0.854
1.648 ÷ 1.663	1.6534	2.23	6.71	30.08	0.030	0.507	0.862
1.663 ÷ 1.679	1.6694	2.86	11.16	39.02	0.051	0.499	0.867

**Таблица 12. Параметры процессов AP(2) в измерениях компоненты ускорения  $a_z$  акселерометром MAMS на отрезке 2**

$f_1 \div f_2$	$f$	$\sigma_0$	$\sigma_r$	$P$	$d$	$\text{Re}\lambda$	$\text{Im}\lambda$
0.373 ÷ 0.391	0.3851	4.84	6.21	12.82	0.072	0.971	0.240
0.391 ÷ 0.410	0.4042	7.85	11.17	14.23	0.065	0.968	0.251
0.410 ÷ 0.425	0.4161	5.90	5.73	9.72	0.035	0.966	0.258
0.425 ÷ 0.440	0.4304	3.22	3.42	10.63	0.040	0.964	0.267
0.674 ÷ 0.694	0.6821	3.38	6.71	19.84	0.049	0.910	0.416
0.698 ÷ 0.720	0.7081	6.38	19.61	30.74	0.128	0.903	0.430
0.720 ÷ 0.735	0.7252	4.97	5.80	11.66	0.005	0.898	0.440
0.735 ÷ 0.750	0.7413	4.40	7.61	17.30	0.031	0.893	0.449
0.750 ÷ 0.771	0.7635	3.01	9.82	32.69	0.136	0.887	0.462
1.450 ÷ 1.458	1.4528	2.24	4.89	21.79	0.025	0.612	0.791

**Таблица 13. Параметры процессов AP(2) в измерениях компоненты ускорения  $a_x$  акселерометром MAMS на отрезке 3**

$f_1 \div f_2$	$f$	$\sigma_0$	$\sigma_r$	$P$	$d$	$\text{Re}\lambda$	$\text{Im}\lambda$
0.115 ÷ 0.125	0.1206	1.58	0.31	1.96	0.017	0.997	0.076
0.174 ÷ 0.193	0.1816	2.64	1.66	6.28	0.076	0.993	0.114
0.193 ÷ 0.205	0.1959	2.47	0.74	3.02	0.010	0.992	0.123
0.260 ÷ 0.274	0.2667	2.82	2.14	7.61	0.040	0.986	0.169
0.327 ÷ 0.350	0.3385	3.60	7.00	19.43	0.258	0.977	0.211
0.350 ÷ 0.357	0.3529	2.06	0.70	3.37	0.007	0.976	0.220
0.369 ÷ 0.376	0.3719	3.30	1.11	3.36	0.008	0.973	0.232
0.381 ÷ 0.391	0.3847	3.73	2.04	5.47	0.009	0.971	0.239
0.391 ÷ 0.398	0.3941	6.04	2.30	3.80	0.006	0.970	0.245
0.398 ÷ 0.418	0.4069	4.05	4.70	11.60	0.052	0.967	0.253
0.418 ÷ 0.434	0.4262	4.00	5.76	14.40	0.053	0.964	0.265
0.722 ÷ 0.735	0.7271	1.99	4.06	20.35	0.061	0.897	0.441
0.735 ÷ 0.762	0.7478	2.86	10.88	38.03	0.167	0.892	0.453
1.621 ÷ 1.644	1.6316	2.55	17.32	67.99	0.112	0.519	0.855
1.645 ÷ 1.661	1.6483	2.85	10.87	37.92	0.053	0.510	0.860
1.661 ÷ 1.688	1.6723	3.68	31.44	85.36	0.230	0.497	0.868

**Таблица 14. Параметры процессов AP(2) в измерениях компоненты ускорения  $a_y$  акселерометром MAMS на отрезке 3**

$f_1 \div f_2$	$f$	$\sigma_0$	$\sigma_r$	$P$	$d$	$\text{Re}\lambda$	$\text{Im}\lambda$
0.073 ÷ 0.093	0.0803	7.13	2.17	3.05	0.091	0.999	0.050
0.369 ÷ 0.376	0.3718	8.17	2.76	3.38	0.009	0.973	0.232
0.376 ÷ 0.391	0.3810	7.69	7.60	9.88	0.044	0.971	0.237
0.391 ÷ 0.398	0.3942	18.30	6.95	3.80	0.006	0.969	0.245
0.398 ÷ 0.418	0.4068	11.75	17.05	14.51	0.091	0.967	0.253
0.418 ÷ 0.432	0.4241	7.06	7.98	11.30	0.021	0.965	0.263
0.432 ÷ 0.452	0.4391	7.13	12.37	17.34	0.104	0.962	0.272
0.676 ÷ 0.696	0.6826	5.02	11.66	23.22	0.065	0.909	0.416
0.711 ÷ 0.733	0.7239	10.47	26.15	24.98	0.082	0.898	0.439
0.738 ÷ 0.754	0.7451	14.95	32.23	21.56	0.062	0.892	0.451
0.760 ÷ 0.779	0.7713	10.48	20.34	19.40	0.041	0.885	0.466
1.643 ÷ 1.660	1.6482	14.69	56.34	38.36	0.050	0.510	0.860
1.662 ÷ 1.688	1.6723	15.96	132.2	83.12	0.221	0.497	0.868

**Таблица 15. Параметры процессов AP(2) в измерениях компоненты ускорения  $a_z$  акселерометром MAMS на отрезке 3**

$f_1 \div f_2$	$f$	$\sigma_0$	$\sigma_r$	$P$	$d$	$\text{Re}\lambda$	$\text{Im}\lambda$
0.069 ÷ 0.086	0.0765	5.61	1.34	2.38	0.055	0.999	0.048
0.442 ÷ 0.460	0.4508	3.72	2.83	7.59	0.015	0.960	0.279
0.460 ÷ 0.481	0.4719	7.04	11.64	16.52	0.055	0.956	0.292
0.728 ÷ 0.764	0.7446	10.29	40.66	39.52	0.151	0.893	0.451
0.765 ÷ 0.787	0.7708	8.41	16.98	20.18	0.044	0.885	0.466
1.470 ÷ 1.499	1.4826	6.56	39.17	56.67	0.128	0.5967	0.803
1.504 ÷ 1.524	1.5140	5.16	21.57	41.84	0.066	0.581	0.814
1.524 ÷ 1.548	1.5368	5.44	36.55	67.22	0.167	0.569	0.822
1.548 ÷ 1.573	1.5604	4.87	30.39	62.40	0.147	0.557	0.831
1.573 ÷ 1.590	1.5817	5.72	33.18	58.01	0.111	0.546	0.838
1.590 ÷ 1.607	1.5977	5.39	31.57	58.54	0.125	0.537	0.844
1.607 ÷ 1.622	1.6132	3.65	9.85	26.94	0.021	0.529	0.849
1.622 ÷ 1.638	1.6336	3.78	12.75	33.72	0.021	0.518	0.855
1.719 ÷ 1.738	1.7304	4.48	22.85	50.96	0.085	0.465	0.885
1.749 ÷ 1.758	1.7511	3.65	5.00	13.70	0.006	0.453	0.891
1.780 ÷ 1.788	1.7847	2.34	1.88	8.04	0.004	0.434	0.901

**Таблица 16. Параметры процессов AP(2) в измерениях компоненты ускорения  $a_x$  акселерометром SAMS на отрезке 4**

$f_1 \div f_2$	$f$	$\sigma_0$	$\sigma_r$	$P$	$d$	$\text{Re}\lambda$	$\text{Im}\lambda$
22.03 ÷ 24.85	23.531	0.99	19.3	19.5	0.074	0.830	0.557
47.86 ÷ 49.80	48.783	3.85	28.7	7.45	0.003	0.338	0.941
57.13 ÷ 58.30	57.595	1.07	8.79	8.20	0.004	0.123	0.992
97.30 ÷ 98.03	97.558	1.19	7.34	6.15	0.005	-0.771	0.636

**Таблица 17. Параметры процессов AP(2) в измерениях компоненты ускорения  $a_y$  акселерометром SAMS на отрезке 4**

$f_1 \div f_2$	$f$	$\sigma_0$	$\sigma_r$	$P$	$d$	$\text{Re}\lambda$	$\text{Im}\lambda$
48.59 ÷ 49.14	48.791	3.18	15.8	4.97	0.002	0.338	0.941
57.13 ÷ 57.87	57.570	2.08	11.2	5.39	0.001	0.124	0.992
93.57 ÷ 94.49	94.014	1.76	14.7	8.36	0.009	-0.712	0.702
97.17 ÷ 98.53	97.674	2.09	18.2	8.70	0.012	-0.773	0.634

**Таблица 18. Параметры процессов AP(2) в измерениях компоненты ускорения  $a_z$  акселерометром SAMS на отрезке 4**

$f_1 \div f_2$	$f$	$\sigma_0$	$\sigma_r$	$P$	$d$	$\text{Re } \lambda$	$\text{Im } \lambda$
48.53 ÷ 49.15	48.796	1.78	8.57	4.82	0.002	0.338	0.941
57.13 ÷ 57.99	57.566	1.69	10.17	6.03	0.002	0.124	0.992
97.05 ÷ 97.54	97.342	2.02	3.90	1.93	0.001	-0.768	0.640
97.54 ÷ 97.97	97.737	2.17	5.86	2.70	0.001	-0.774	0.633

**Таблица 19. Параметры процессов AP(2) в измерениях компоненты ускорения  $a_x$  акселерометром SAMS на отрезке 5**

$f_1 \div f_2$	$f$	$\sigma_0$	$\sigma_r$	$P$	$d$	$\text{Re } \lambda$	$\text{Im } \lambda$
5.93 ÷ 6.54	6.290	2.06	2.38	1.15	0.004	0.986	0.157
6.54 ÷ 7.15	6.913	2.21	2.78	1.26	0.003	0.985	0.173
10.14 ÷ 11.24	10.828	3.29	12.28	3.73	0.011	0.963	0.269
11.30 ÷ 12.45	11.815	3.57	13.87	3.88	0.010	0.956	0.293
25.58 ÷ 27.59	26.635	3.09	52.7	17.1	0.047	0.784	0.620
48.45 ÷ 49.15	48.772	3.49	18.52	5.31	0.001	0.338	0.941
96.93 ÷ 97.85	97.419	1.54	8.25	5.35	0.004	-0.769	0.639
101.99 ÷ 102.37	102.214	13.2	41.9	3.19	0.002	-0.840	0.542

**Таблица 20. Параметры процессов AP(2) в измерениях компоненты ускорения  $a_y$  акселерометром SAMS на отрезке 5**

$f_1 \div f_2$	$f$	$\sigma_0$	$\sigma_r$	$P$	$d$	$\text{Re } \lambda$	$\text{Im } \lambda$
9.96 ÷ 11.84	11.142	9.42	48.7	5.17	0.018	0.961	0.276
25.58 ÷ 26.07	25.843	2.20	6.98	3.18	0.002	0.796	0.605
26.07 ÷ 26.92	26.524	3.34	25.3	7.58	0.010	0.786	0.618
26.92 ÷ 28.40	27.421	3.61	40.1	11.1	0.019	0.771	0.636
48.45 ÷ 49.14	48.772	2.96	15.7	5.31	0.001	0.338	0.941
56.89 ÷ 57.74	57.397	1.20	10.92	9.12	0.004	0.128	0.992
97.09 ÷ 97.78	97.425	1.71	9.33	5.46	0.005	-0.769	0.639
101.69 ÷ 102.48	102.209	5.39	17.8	3.31	0.003	-0.840	0.542

**Таблица 21. Параметры процессов AP(2) в измерениях компоненты ускорения  $a_z$  акселерометром SAMS на отрезке 5**

$f_1 \div f_2$	$f$	$\sigma_0$	$\sigma_r$	$P$	$d$	$\text{Re}\lambda$	$\text{Im}\lambda$
10.13 ÷ 11.24	10.877	1.91	7.59	3.96	0.013	0.963	0.270
11.30 ÷ 11.96	11.672	2.51	6.25	2.49	0.005	0.957	0.290
48.28 ÷ 49.15	48.773	1.57	8.48	5.42	0.001	0.338	0.941
97.06 ÷ 97.84	97.471	2.81	17.79	6.33	0.005	-0.770	0.638
101.44 ÷ 102.85	102.224	6.52	33.34	5.11	0.006	-0.841	0.542

**Таблица 22. Параметры процессов AP(2) в измерениях компоненты ускорения  $a_x$  акселерометром SAMS на отрезке 6**

$f_1 \div f_2$	$f$	$\sigma_0$	$\sigma_r$	$P$	$d$	$\text{Re}\lambda$	$\text{Im}\lambda$
4.85 ÷ 6.68	5.710	2.06	5.91	2.87	0.026	0.990	0.143
6.68 ÷ 8.12	7.451	1.56	4.61	2.95	0.016	0.982	0.186
8.12 ÷ 10.14	9.268	2.13	12.14	5.71	0.038	0.973	0.231
25.34 ÷ 26.37	25.887	1.65	13.82	8.39	0.012	0.796	0.606
26.37 ÷ 27.29	26.844	1.50	11.65	7.78	0.010	0.781	0.625
27.29 ÷ 28.08	27.699	1.66	12.31	7.42	0.008	0.767	0.641
28.08 ÷ 29.79	28.850	2.61	37.5	14.4	0.030	0.748	0.663
48.20 ÷ 49.35	48.797	4.49	38.28	8.53	0.005	0.338	0.941
57.13 ÷ 57.56	57.371	1.95	6.74	3.46	0.001	0.129	0.992
83.82 ÷ 85.76	84.693	2.58	60.6	23.5	0.049	-0.529	0.848
85.76 ÷ 87.35	86.477	2.13	33.3	15.66	0.023	-0.567	0.824
104.75 ÷ 105.90	105.277	5.28	25.4	4.81	0.005	-0.880	0.476
105.90 ÷ 106.57	106.256	2.40	8.31	3.46	0.004	-0.891	0.454
106.57 ÷ 108.04	107.092	2.39	19.5	8.16	0.021	-0.900	0.435

**Таблица 23. Параметры процессов AP(2) в измерениях компоненты ускорения  $a_y$  акселерометром SAMS на отрезке 6**

$f_1 \div f_2$	$f$	$\sigma_0$	$\sigma_r$	$P$	$d$	$\text{Re } \lambda$	$\text{Im } \lambda$
25.33 ÷ 26.36	25.920	2.31	18.5	7.99	0.011	0.795	0.606
26.37 ÷ 28.08	27.344	2.47	53.2	15.3	0.036	0.773	0.634
28.08 ÷ 29.79	28.872	4.66	61.2	13.1	0.025	0.748	0.664
48.16 ÷ 49.33	48.792	4.04	34.7	8.60	0.005	0.338	0.941
57.27 ÷ 57.56	57.377	3.80	12.3	3.23	0.001	0.128	0.992
104.75 ÷ 105.90	105.297	17.2	74.3	4.32	0.004	-0.880	0.475
105.90 ÷ 108.05	106.623	9.66	10.4	10.8	0.036	-0.895	0.446

**Таблица 24. Параметры процессов AP(2) в измерениях компоненты ускорения  $a_z$  акселерометром SAMS на отрезке 6**

$f_1 \div f_2$	$f$	$\sigma_0$	$\sigma_r$	$P$	$d$	$\text{Re } \lambda$	$\text{Im } \lambda$
48.10 ÷ 49.34	48.810	2.18	19.54	8.95	0.006	0.337	0.941
57.27 ÷ 57.56	57.379	2.98	9.52	3.20	0.001	0.128	0.992
96.62 ÷ 98.34	97.531	4.09	47.21	11.54	0.020	-0.771	0.637
104.68 ÷ 105.91	105.276	8.01	43.79	5.47	0.008	-0.880	0.476

**Таблица 25. Среднеквадратичные значения на этапах обработки данных MAMS**

Компонента	Отрезок	После удаления циклических трендов, $10^{-6}$ м/с <sup>2</sup>	После удаления AP процессов, $10^{-6}$ м/с <sup>2</sup>	Отношение
$a_x$	1	0.017	0.013	1.31
	2	0.025	0.015	1.67
	3	0.061	0.037	1.65
$a_y$	1	0.114	0.087	1.31
	2	0.174	0.120	1.45
	3	0.527	0.321	1.64
$a_z$	1	0.058	0.045	1.29
	2	0.095	0.064	1.48
	3	0.195	0.133	1.47

**Таблица 26. Среднеквадратичные значения на этапах обработки данных SAMS**

Компонента	Отрезок	После удаления циклических трендов, $10^{-2}$ м/с <sup>2</sup>	После удаления АР процессов, $10^{-2}$ м/с <sup>2</sup>	Отношение
$a_x$	4	0.544	0.249	2.18
	5	4.399	1.586	2.77
	6	2.528	1.163	2.17
$a_y$	4	0.912	0.622	1.47
	5	3.910	1.885	2.07
	6	11.44	5.138	2.23
$a_z$	4	0.466	0.274	1.70
	5	1.504	0.615	2.45
	6	2.470	1.055	2.34