



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • [Электронная библиотека](#)

[Препринты ИПМ](#) • [Препринт № 23 за 2011 г.](#)



Путин Г.Ф., Глухов А.Ф.,  
Завалишин Д.А., Беляев М.Ю.,  
[Сазонов В.В.](#)

Исследование  
микроускорений на борту  
МКС с помощью датчика  
конвекции ДАКОН-М

**Рекомендуемая форма библиографической ссылки:** Исследование микроускорений на борту МКС с помощью датчика конвекции ДАКОН-М / Г.Ф.Путин [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2011. № 23. 26 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2011-23>

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

Г.Ф. Путин, А.Ф. Глухов, Д.А. Завалишин,  
М.Ю. Беляев, В.В. Сазонов

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОУСКОРЕНИЙ НА БОРТУ МКС  
С ПОМОЩЬЮ ДАТЧИКА КОНВЕКЦИИ ДАКОН-М

Москва – 2011

## Аннотация

Описаны результаты экспериментов с датчиком конвекции ДАКОН-М на борту Российского сегмента Международной космической станции (МКС). Проведено сопоставление измерений датчика и результатов расчета квазистатической компоненты микроускорения в точке его установки. Для сопоставления взяты три отрезка измерений из экспериментов 2009 г., во время которых проводились стыковки космических кораблей со станцией, отстыковки от нее, и происходило срабатывание реактивных двигателей системы ориентации. При расчете микроускорения использованы данные измерений низкочастотного акселерометра MAMS, установленного в Американском сегменте, и телеметрическая информация о вращательном движении МКС. Эта информация позволила пересчитать измерения MAMS в точку установки датчика конвекции ДАКОН-М. Сравнение показаний датчика и расчетных микроускорений показало определенное совпадение расчетных и измеренных данных, что позволяет сделать вывод о перспективности идеи использования датчиков такого рода для мониторинга квазистатических микроускорений.

**G.F.Putin, A.F.Glukhov, D.A.Zavalishin, M.Yu.Belyaev, V.V.Sazonov.**  
**Investigation of microgravity environment on board ISS using convection sensor DAKON-M.** We describe the results of the experiments with convection sensor DAKON-M, installed on board the International Space Station (ISS). The measurements of the sensor and the quasi-steady accelerations, constructed in the point of its installation, were compared. For comparison 3 segments, obtained during the experiments in 2009, were selected. On these segments the dynamical operations of the dockings, undocking and the Service module engines burns were carried out. For the acceleration constructing the measurements of the low-frequency accelerometer MAMS located on board the ISS American segment and the telemetry information about the stations angular motion were used. The data allowed recalculating the MAMS measurements into the point of the convection sensor DAKON-M installation. The comparison of the sensor measurements and the constructed accelerations shows the certain coincidence that allows drawing a conclusion about availability of using sensors of such kind for quasi-steady accelerations monitoring.

**1. Датчик конвекции ДАКОН-М.** Датчик конвекции ДАКОН-М представляет собой полость в форме цилиндра, заполненную углекислым газом. Диаметр и высота цилиндра имеют одинаковое значение  $L = 10$  см. На противоположных основаниях цилиндра поддерживается фиксированная разность температур  $\Delta T = 60^\circ \text{C}$ . Внутри полости установлены две дифференциальные термопары для измерения разностей температур в двух парах фиксированных точек. Эти разности температур – показания датчика. Датчик ДАКОН-М является усовершенствованным вариантом датчика ДАКОН, эксперименты с которым проводились на орбитальной станции «Мир» [1]. Как показано в [2 – 4], показания датчика конвекции зависят от испытываемых им микроускорений. Такой датчик – пример гравитационно-чувствительной системы.

Измерения ДАКОНа-М выдаются в цифровом виде с шагом в одну секунду. Чтобы проинтерпретировать эти измерения, свяжем с датчиком правую декартову систему координат  $Dx_1x_2x_3$ . Начало системы, точка  $D$ , находится на оси цилиндра вблизи его центра. Ось  $Dx_3$  направлена по оси цилиндра от его холодного основания к горячему. Пары точек, в которых измеряются разности температур, расположены на осях  $Dx_1$  и  $Dx_2$ . Точки каждой пары расположены симметрично относительно оси  $Dx_3$ , причем все точки одинаково удалены от нее.

Влияние микроускорений на датчик конвекции зависит от частотных свойств датчика и микроускорений. В орбитальном полете датчик ведет себя как линейный фильтр низких частот, и его показания допускают простую интерпретацию. Обозначим  $Q_1$  и  $Q_2$  разности температур в термопарах, расположенных по осям  $Dx_1$  и  $Dx_2$  соответственно. Пусть  $\varepsilon_i$  и  $n_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ), – компоненты в системе координат  $Dx_1x_2x_3$  низкочастотных составляющих углового ускорения этой системы и микроускорения точки  $D$ ,  $\beta \approx 0.003 \text{K}^{-1}$  – коэффициент теплового расширения газа в полости. Тогда  $Q_1 \sim F_1$ ,  $Q_2 \sim F_2$ , где

$$F_1 = kn_1 - 2\varepsilon_2, \quad F_2 = kn_2 + 2\varepsilon_1, \quad k = \frac{\beta\Delta T}{L} \approx 1.8 \text{m}^{-1}. \quad (1)$$

Как видно из приведенных соотношений, показания датчика могут служить интегральной характеристикой микрогравитационной обстановки на борту космического аппарата в области низких частот. Кроме того, сравнение измерений датчика с результатами математического моделирования конвекции газа в полости, полученными с учетом реальных испытываемых полостью линейных и угловых микроускорений (ср. [3–5]), позволит оценить точность принятой математической модели. Все это объясняет интерес к экспериментам такого рода.

Ниже проводится предварительный анализ экспериментов с датчиком ДАКОН-М на борту МКС. Он заключается в сопоставлении показаний датчика с величинами  $F_1$  и  $F_2$ . Последние рассчитаны по телеметрической ин-

формации о вращательном движении станции и по данным измерений американского акселерометра MAMS.

**2. Исследуемые данные измерений ДАКОНа-М.** На исследуемых ниже отрезках времени датчик конвекции ДАКОН-М был установлен в Служебном модуле (СМ) МКС. Направления осей системы координат  $Dx_1x_2x_3$  датчика в строительной системе  $Oy_1y_2y_3$  СМ задавались формулами  $Dx_1 = -Oy_2$  и  $Dx_2 = -Oy_1$ . При этом ось  $Oy_1$  параллельна продольной оси СМ и направлена от его переходного отсека к агрегатному отсеку, ось  $Oy_2$  перпендикулярна оси вращения солнечных батарей СМ, начало системы  $Oy_1y_2y_3$  находится в геометрическом центре седьмого шпангоута СМ. Координаты точки  $D$  в системе  $Oy_1y_2y_3$  известны. Ниже, если не оговорено особо, компоненты векторов и координаты точек указываются в системе  $Oy_1y_2y_3$ .

Для исследования были взяты три отрезка данных измерений ДАКОНа-М. Эти данные, а также данные измерений микроускорений, графики функций  $F_1(t)$ ,  $F_2(t)$  и ряда вспомогательных зависимостей представлены на рис. 1 – 4. Рис. 1, 3 и 4 относятся к отрезкам 1, 2 и 3 соответственно, на рис. 2 представлена аналогичная графическая информация для части отрезка 1 – отрезка 1'. Некоторые сведения об этих отрезках приведены в табл. 1 – 3. В табл. 1 для каждого отрезка указана информация о типе операции (стыковка или отстыковка), дата и время начала проведения операции, наименование модуля или узла МКС, а также космического аппарата, задействованных в операции. В табл. 2 приведены начальные точки  $t_0$ , количество точек и длины выбранных отрезков измерений ДАКОНа-М. Графики этих измерений изображены черными линиями в левых частях рис. 1 – 4 с индексом «2». В табл. 3 приведены координаты точек установки акселерометра и датчика конвекции на указанных отрезках.

На отрезке 1 происходило причаливание транспортного грузового корабля «Прогресс-М» к стыковочному узлу «Пирс» станции, на отрезке 2 со станцией стыковался американский шаттл, на отрезке 3 тот же шаттл отстыковывался от станции. На всех выбранных отрезках МКС находилась в орбитальной ориентации, которая поддерживалась реактивными двигателями СМ или транспортного грузового корабля «Прогресс-М». Порядок и длительность включения двигателей определялись бортовым компьютером с учетом информации об отклонении станции от требуемого положения. Двигатели выключались за несколько минут до начала динамической операции и включались через несколько минут после ее окончания. На выбранных отрезках данных измерений датчика конвекции имели место и контакты кораблей со станцией, и срабатывания реактивных двигателей.

**3. Измерения акселерометра MAMS.** Низкочастотный акселерометр MAMS установлен в модуле Lab Американского сегмента МКС и измеряет кажущееся ускорение – микроускорение с обратным знаком. В описываемом исследовании его измерения рассматриваются как измерения микроускорения в левой

системе координат  $Mz_1z_2z_3$ , направления осей которой связаны со строительной системой СМ формулами:  $Mz_1 = Oy_1$ ,  $Mz_2 = Oy_2$  и  $Mz_3 = -Oy_3$ . Координаты акселерометра в системе  $Oy_1y_2y_3$  известны.

Скорость выборки MAMS – 10 измерений в секунду, прибор позволяет измерять микроускорения в диапазоне частот  $10^{-5} \div 5$  Гц и диапазоне амплитуд  $10^{-6} \div 2 \cdot 10^{-3}$  м/с<sup>2</sup>.

Группа PIMS (Principal Investigator Microgravity Services) NASA, курирующая MAMS, обрабатывает полученные данные с целью выделения квазистатической составляющей, а также устранения смещения нуля. Обработанные PIMS данные имеют шаг по времени 16 секунд. Файлы как с исходными (сырыми) данными измерений акселерометра, так и с обработанными доступны на сайте PIMS. В данном исследовании использованы обработанные данные акселерометра, пересчитанные в систему  $Oy_1y_2y_3$ .

Ниже измерения MAMS рассматриваются на тех же отрезках времени, что и данные измерений ДАКОНа-М. В табл. 2 приведены начальные точки  $t_0$ , количество точек с измерениями и длины выбранных отрезков измерений MAMS. Построенные по этим измерениям графики микроускорения  $n_1$ ,  $n_2$  и  $n_3$  изображены черными линиями в левых частях рис. 1 – 4 с индексом «в».

Согласно подходу, принятому в PIMS, квазистатическая составляющая микроускорения не должна содержать колебания с частотами более 0.01 Гц. Однако в обработанных данных MAMS присутствуют заметные колебания и с более высокими частотами. Датчик на такие сравнительно высокочастотные колебания не реагирует, поэтому в описываемом исследовании проводилось дополнительное сглаживание (низкочастотная фильтрация) данных MAMS.

Сглаживающие ряды строились независимо для каждой компоненты микроускорения. Ряды, построенные по данным измерений на отрезке времени  $t_0 \leq t \leq t_0 + T$  ( $T > 0$ ), имели вид [6]

$$n_{i,sm}(t) = \alpha_i + \beta_i(t - t_0) + \sum_{m=1}^M a_{im} \sin \frac{\pi m(t - t_0)}{T} \quad (i = 1, 2, 3). \quad (2)$$

Коэффициенты  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$ ,  $a_{im}$  находились методом наименьших квадратов, затем коэффициенты при старших гармониках умножались на корректирующие множители. Графики построенных выражений (2) изображены красными линиями в левых частях рис. 1 – 4 с индексом «в». Данные на отрезках 1, 2 и 3 сглажены при  $M = 250$ , на отрезке 1' – при  $M = 110$ . Отношение  $T / M$  составило: на отрезке 1 – 47 с, на отрезке 2 – 40 с, на отрезке 3 – 27 с, на отрезке 1' – 16 с.

**4. Расчет квазистатической составляющей микроускорения по телеметрическим измерениям.** Для расчета квазистатической составляющей микроускорения известна простая формула. Пусть станция представляет собой твердое тело, и точка  $P$  жестко с ней связана. Тогда квазистатическая составляющая  $\mathbf{n}$  микроускорения в точке  $P$  имеет вид [2, 5, 6]

$$\mathbf{n}_P = \mathbf{n}(\mathbf{r}) + \mathbf{w}, \quad \mathbf{n}(\mathbf{r}) = \mathbf{r} \times \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} + (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \times \boldsymbol{\omega} + \frac{\mu_e}{|\mathbf{R}|^3} \left[ \frac{3(\mathbf{R} \cdot \mathbf{r})\mathbf{R}}{|\mathbf{R}|^2} - \mathbf{r} \right]. \quad (3)$$

Здесь  $\mathbf{n}(\mathbf{r})$  – составляющая микроускорения, вызываемая силами инерции и гравитации,  $\mathbf{w}$  – слагаемое, обусловленное силами иной природы,  $\mathbf{r}$  – радиус-вектор точки  $P$  относительно центра масс станции,  $\mathbf{R}$  – геоцентрический радиус-вектор этого центра масс,  $\boldsymbol{\omega}$  – абсолютная угловая скорость станции,  $\mu_e$  – гравитационный параметр Земли.

Слагаемое  $\mathbf{w}$  не зависит от выбора точки  $P$  на станции. Если движение последней неуправляемо или управляется посредством гироскопов, то это слагаемое определяется в основном аэродинамическим сопротивлением [2, 5, 6]. На отрезках полета, рассматриваемых в данной работе,  $\mathbf{w}$  содержит дополнительный вклад от сил, создаваемых двигателями ориентации и стыковками или расстыковками кораблей со станцией.

Если в некоторой точке борта  $Q$ , имеющей радиус-вектор  $\mathbf{r}'$  относительно центра масс станции, измерить микроускорение  $\mathbf{n}_Q = \mathbf{n}(\mathbf{r}') + \mathbf{w}$  и по какой-либо информации найти величины  $\boldsymbol{\omega}$ ,  $d\boldsymbol{\omega}/dt$  и  $\mathbf{R}$ , то согласно (3) по формуле  $\mathbf{n}_P = \mathbf{n}_Q - \mathbf{n}(\mathbf{r}') + \mathbf{n}(\mathbf{r})$  можно найти реальную квазистатическую составляющую микроускорения в любой точке борта  $P$ . Поскольку корпус станции испытывает упругие колебания, такой пересчет справедлив только для квазистатической составляющей микроускорения – с частотами ниже частот упругих колебаний. По этой причине измерения  $\mathbf{n}_Q$  и расчет величин  $\boldsymbol{\omega}$ ,  $d\boldsymbol{\omega}/dt$  и  $\mathbf{R}$  должны быть выполнены на достаточно продолжительном отрезке времени.

Справедливость описанного подхода в определенной степени подтверждается результатами [6]. В этой работе формула  $\mathbf{n}_Q = \mathbf{n}(\mathbf{r}') + \mathbf{w}$  позволила со среднеквадратичной ошибкой около  $10^{-6} \text{ м/с}^2$  согласовать измерения MAMS и расчет микроускорений по движению МКС в случае, когда это движение управлялось с помощью гироскопов.

Аппроксимация фактического вращательного движения станции в [6] и в данной работе выполнялась по телеметрическим значениям компонент вектора  $\boldsymbol{\omega}$  и кватерниона, задающего ориентацию системы  $Oy_1y_2y_3$  относительно абсолютной системы координат J2000. Эти значения доступны в дискретные моменты времени с шагом около 1 с. Телеметрическая информация использовалась следующим образом. Сначала на некотором интервале времени компоненты кватерниона сглаживались выражениями вида (2). Затем по этим выражениям (нормированным на 1) и кинематическим соотношениям вычислялись угловые скорость и ускорение станции. Данные измерений компонент угловой скорости также сглаживались выражениями вида (2), и их графики сравнивались с графиками компонент угловой скорости, рассчитанных по кватерниону. Такое сравнение позволяло контролировать выбор числа гармоник в сглаживающих

выражениях. Некоторые результаты аппроксимации вращательного движения станции представлены на рис. 1 – 4 с индексами «а» и «б».

На рисунках с индексом «а» слева маркерами указаны телеметрические значения компонент кватерниона (для каждой компоненты приведено только каждое сотое значение для отрезков 1, 2, 3 и каждое пятидесятое для отрезка 1'), сплошными кривыми изображены графики соответствующих сглаживающих выражений. На графиках справа сплошные кривые представляют рассчитанную с помощью этих выражений зависимость от времени углов Крылова, которые задают положение системы координат  $Oy_1y_2y_3$  относительно орбитальной системы  $CY_1Y_2Y_3$ . Орбитальная система и углы определены так.

Точка  $C$  – центр масс станции, ось  $CY_2$  направлена по геоцентрическому радиусу-вектору этой точки, ось  $CY_3$  направлена противоположно вектору орбитального кинетического момента станции, ось  $CY_1$  дополняет систему до правой. Углы Крылова  $\psi$  (рысканье),  $\gamma$  (крен) и  $\theta$  (тангаж) введены с помощью условия, что оси системы  $CY_1Y_2Y_3$  могут быть расположены параллельно одноименным осям системы  $Oy_1y_2y_3$  тремя последовательными поворотами. Первый поворот – на угол  $\psi$  вокруг оси  $CY_2$ , второй поворот – на угол  $\gamma$  вокруг новой оси  $CY_1$ , третий поворот – на угол  $\theta$  вокруг новой оси  $CY_3$ , совпадающей с осью  $Cy_3$ . При построении орбитальной системы координат использовалась достаточно детальная модель движения центра масс станции.

Вернемся к рисункам. Маркеры рядом с правыми кривыми на рис. 1а – 4а указывают значения углов (каждое сотое значение для отрезков 1, 2, 3 и каждое пятидесятое для отрезка 1'), рассчитанные по телеметрическим значениям кватерниона. На рис. 1 – 4 с индексом «б» слева приведены графики компонент угловой скорости станции. Черные кривые – результат расчета с помощью выражений, сглаживающих кватернион, красные кривые – результат сглаживания телеметрических значений угловой скорости. Справа на этих рисунках приведены графики компонент углового ускорения станции, рассчитанного по сглаживающим кватернион выражениям.

Результаты пересчета квазистатической составляющей микроускорения из точки расположения МАМС в точку расположения ДАКОНа-М приведены на рис. 1 – 4 с индексом «в». Здесь черными линиями в правых частях рисунков изображены графики компонент  $n_1$ ,  $n_2$  и  $n_3$  этой составляющей.

**5. Сопоставление результатов.** Измерения датчика конвекции сопоставлялись с параметрами микрогравитационной среды, имевшей место при проведении измерений. Как было указано в п. 1, входными сигналами датчика служат функции  $F_1(t)$  и  $F_2(t)$ , определенные формулами (1). Эти функции были рассчитаны по значениям компонент микроускорения в точке установки датчика и компонент углового ускорения станции. Графики входных сигналов изображены красными линиями в левых частях рис. 1 – 4 с индексом «г» рядом с графиками соответствующих измерений  $Q_1(t)$  и  $Q_2(t)$ . Непосредственное срав-



нение функций  $F_i(t)$  и  $Q_i(t)$  затруднительно, поскольку они измеряются в разных единицах. Более информативно сравнение безразмерных центрированных функций

$$F_i'(t) = \frac{F_i(t) - \langle F_i \rangle}{F_i^*}, \quad Q_i'(t) = \frac{Q_i(t) - \langle Q_i \rangle}{Q_i^*},$$

$$F_i^* = \max_t |F_i(t) - \langle F_i \rangle|, \quad Q_i^* = \max_t |Q_i(t) - \langle Q_i \rangle| \quad (i=1, 2).$$

Графики таких функций приведены в правых частях рис. 1з – 4з (черные линии – измерения, красные – входной сигнал). Как видно из рисунков, имеет место определенное сходство обоих наборов функций, что свидетельствует о перспективности применения датчиков такого рода в мониторинге квазистатических микроускорений на борту космических аппаратов (ср. [2 – 4]).

Данная работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 11-01-00262). Авторы благодарны сотрудникам группы PIMS и В.И. Полежаеву за полезные обсуждения при выполнении работы

### Список литературы

1. Бабушкин И.А., Богатырев Г.П., Глухов А.Ф., Путин Г.Ф., Авдеев С.В., Иванов А.И., Максимова М.М. Изучение тепловой конвекции и низкочастотной микрогравитации на орбитальном комплексе «Мир» при помощи датчика «Дакон». Космические исследования, 2001, т. 39, № 2, с. 161-169.
2. Сазонов В.В., Комаров М.М., Полежаев В.И., Никитин С.А., Ермаков М.К., Зыков С.Г., Стажков В.М., Рябуха С.Б., Асеведо Х., Либерман Е. Микроускорения на орбитальной станции «Мир» и оперативный анализ гравитационной чувствительности конвективных процессов тепло-массопереноса. Космические исследования, 1999, т. 37, № 1, с. 86-101.
3. Бессонов О.А., Полежаев В.И. Математическое моделирование конвекции в датчике «Дакон» в условиях реального космического полета. Космические исследования, 2001, т. 39, № 2, с. 170-178.
4. Никитин С.А., Полежаев В.И., Сазонов В.В. Об измерении квазистатической компоненты микроускорения на борту ИСЗ с помощью датчика конвекции. Космические исследования, 2001, т. 39, № 2, с. 179-187.
5. Сазонов В.В., Беляев М.Ю., Ефимов Н.И., Стажков В.М., Бабкин Е.В. Определение квазистатической компоненты микроускорения на станции «Мир». Космические исследования, 2001, т. 39, № 2, с. 136-147.
6. Бабкин Е.В., Беляев М.Ю., Ефимов Н.И., Сазонов В.В., Стажков В.М. Определение квазистатической компоненты микроускорения, возникающего на борту Международной космической станции. Космические исследования, 2004, т. 42, № 2, с. 162-171.

**Таблица 1. Динамические операции на отрезках 1 – 3**

Отрезок	Дата	Время начала операции	Стыков. узел	КА	Операция
1	13.02.2009	10:19:13	Пирс	ТГК М66	Отстыковка
2	18.03.2009	00:19:53	РМА-2	STS-119	Стыковка
3	25.03.2009	22:53:44	РМА-2	STS-119	Отстыковка

**Таблица 2. Характеристики выбранных отрезков данных измерений ДАКОН-М и MAMS**

Отрезок	Интервал аппроксимации движения станции		Количество точек $M$	
	$t_0$ (ДМВ)	Длина (мин)	ДАКОН-М	MAMS (oss)
1	08:55:30	196.2	11772	736
1'	10:09:30	30.0	1802	113
2	23:36:40	166.7	9954	625
3	21:10:00	112.4	6744	422

**Таблица 3. Координаты MAMS и ДАКОН-М на отрезках 1 – 3 в соответствии с текущими массово-инерционными характеристиками (МИХ) МКС**

МИХ	Время действия МИХа между операциями	Координаты ДАКОН-М	Координаты MAMS
2340	Перед отстыковкой ТГК М66 13.02.2009	29.2, -0.5, -2.6	-6.6, -0.2, -2.8
2330	Между отстыковкой ТГК М66 и стыковкой STS-119 13.02.2009 ÷ 18.03.2009	28.7, -0.3, -2.5	-7.1, 0, -2.7
1370	Между стыковкой и отстыковкой STS-119 18.03.2009 ÷ 25.03.2009	34.6, 3.4, -2.7	-1.1, 3.7, 1.9
1420	После отстыковки STS-119 25.03.2009	28.9, -0.4, -0.1	-6.9, -0.1, 0.4

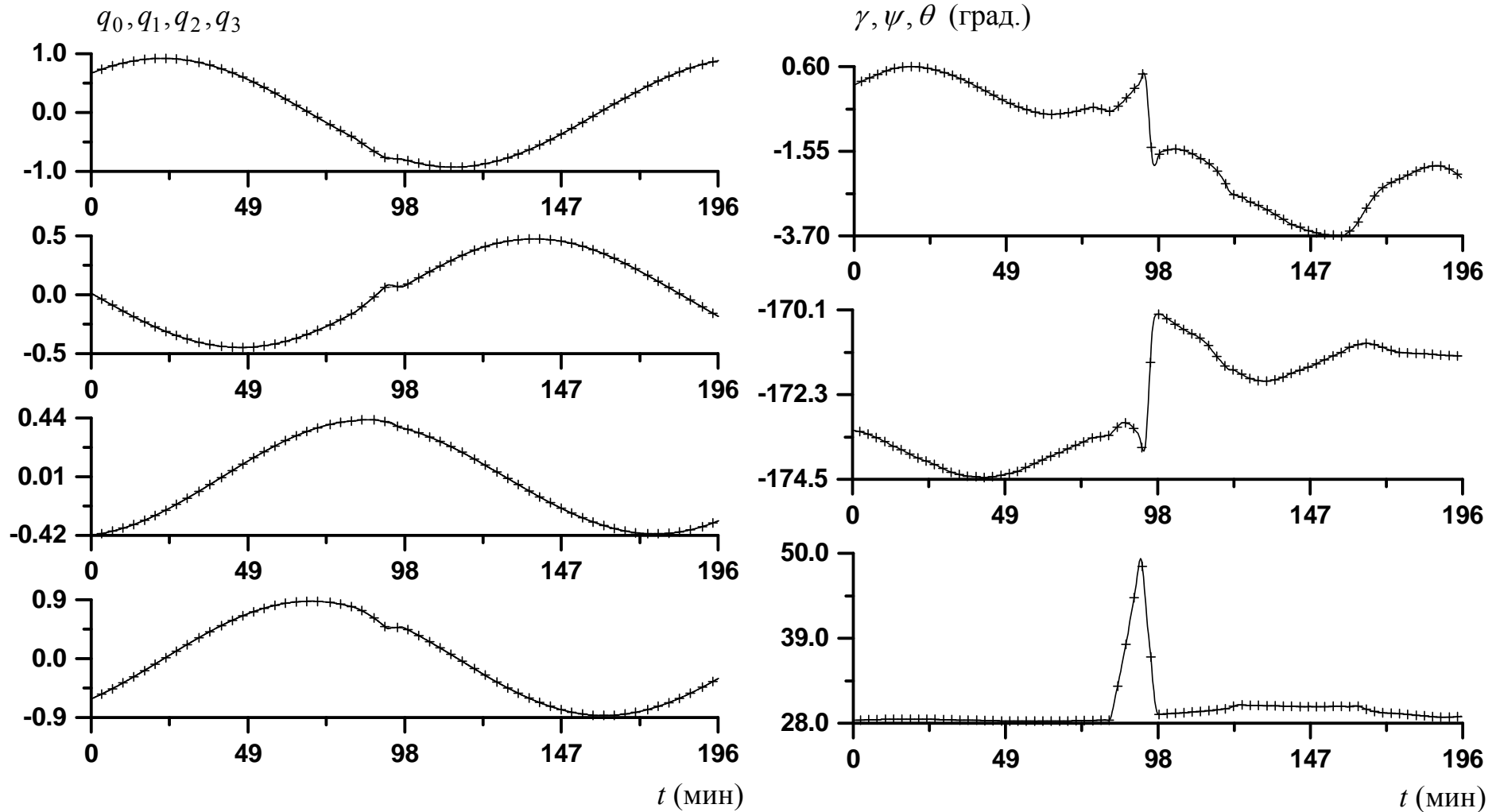


Рис. 1а. Отрезок 1. Момент  $t = 0$  соответствует: 08:55:30 ДМВ 13.02.2009.  
 Слева – компоненты кватерниона, справа – углов.

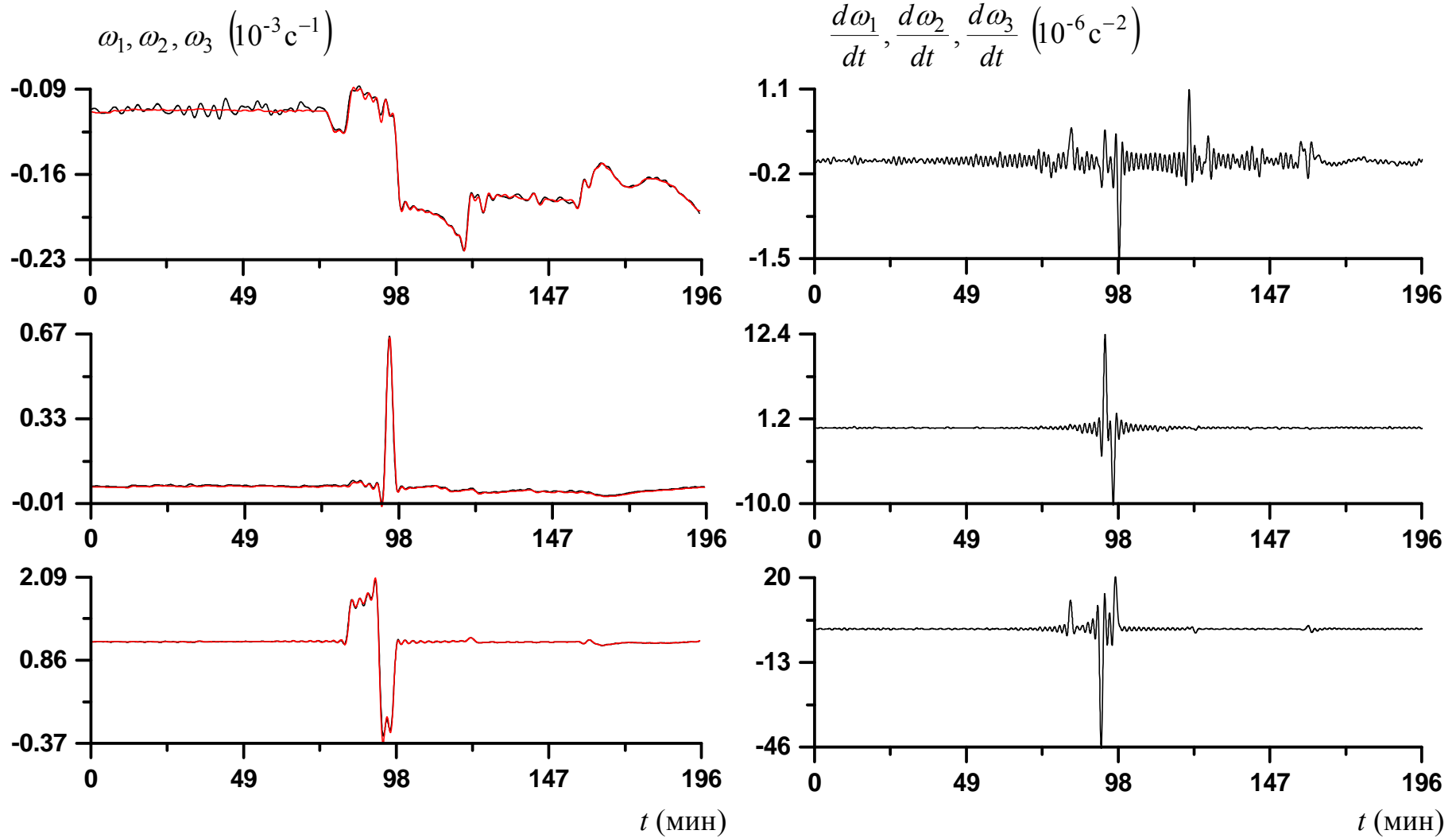


Рис. 1б. Отрезок 1. Момент  $t = 0$  соответствует: 08:55:30 ДМВ 13.02.2009.  
 Слева – компоненты угловой скорости, справа – углового ускорения.

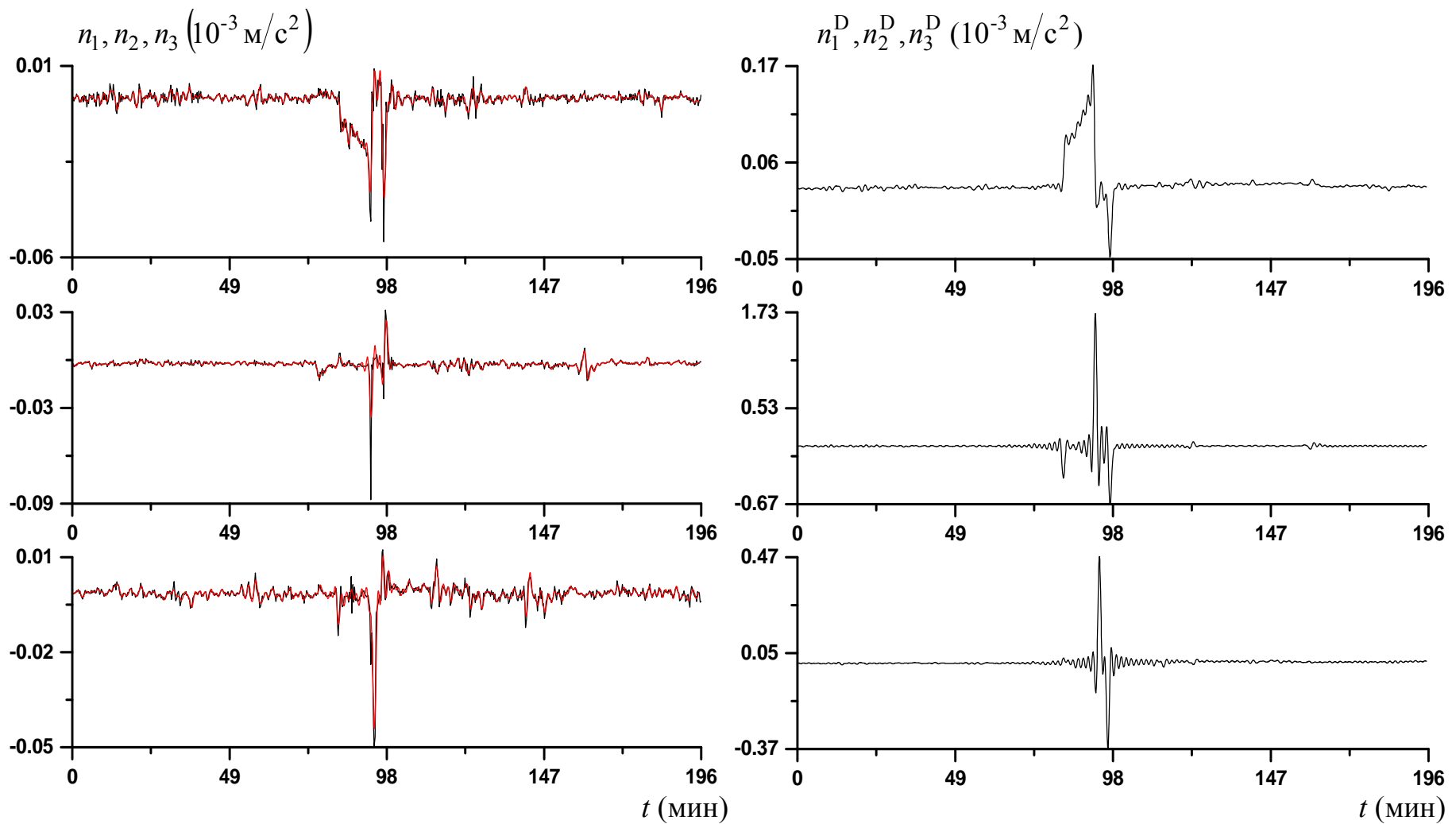
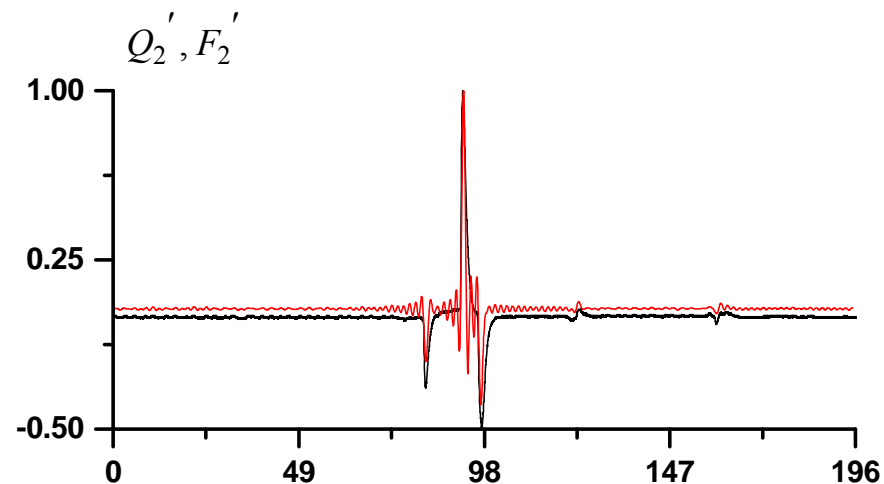
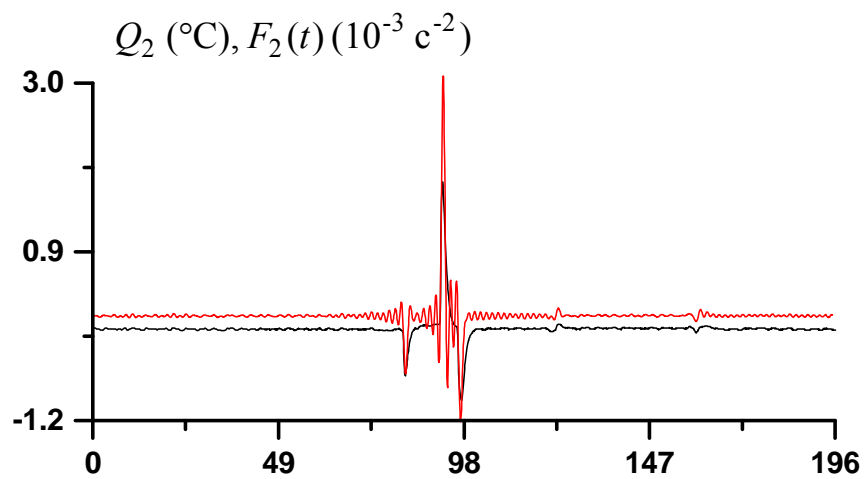
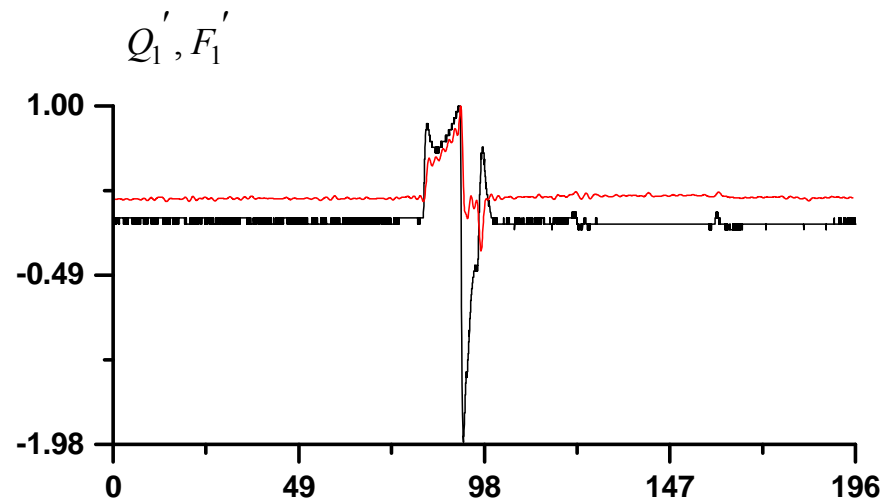
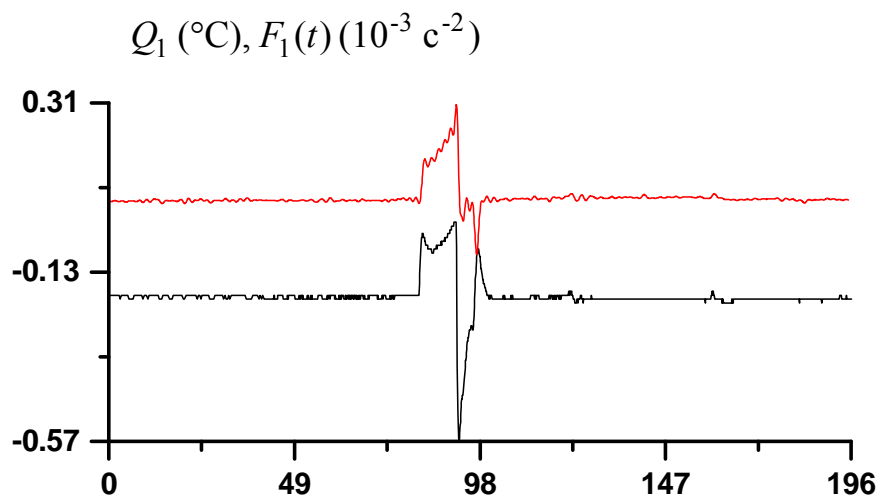


Рис. 1в. Отрезок 1. Момент  $t = 0$  соответствует: 08:55:30 ДМВ 13.02.2009. Слева – данные MAMS и их аппроксимация, справа – данные MAMS, пересчитанные в точку установки ДАКОНа.



$t$  (МИН)

$t$  (МИН)

Рис. 1г. Отрезок 1. Момент  $t = 0$  соответствует: 08:55:30 ДМВ 13.02.2009.

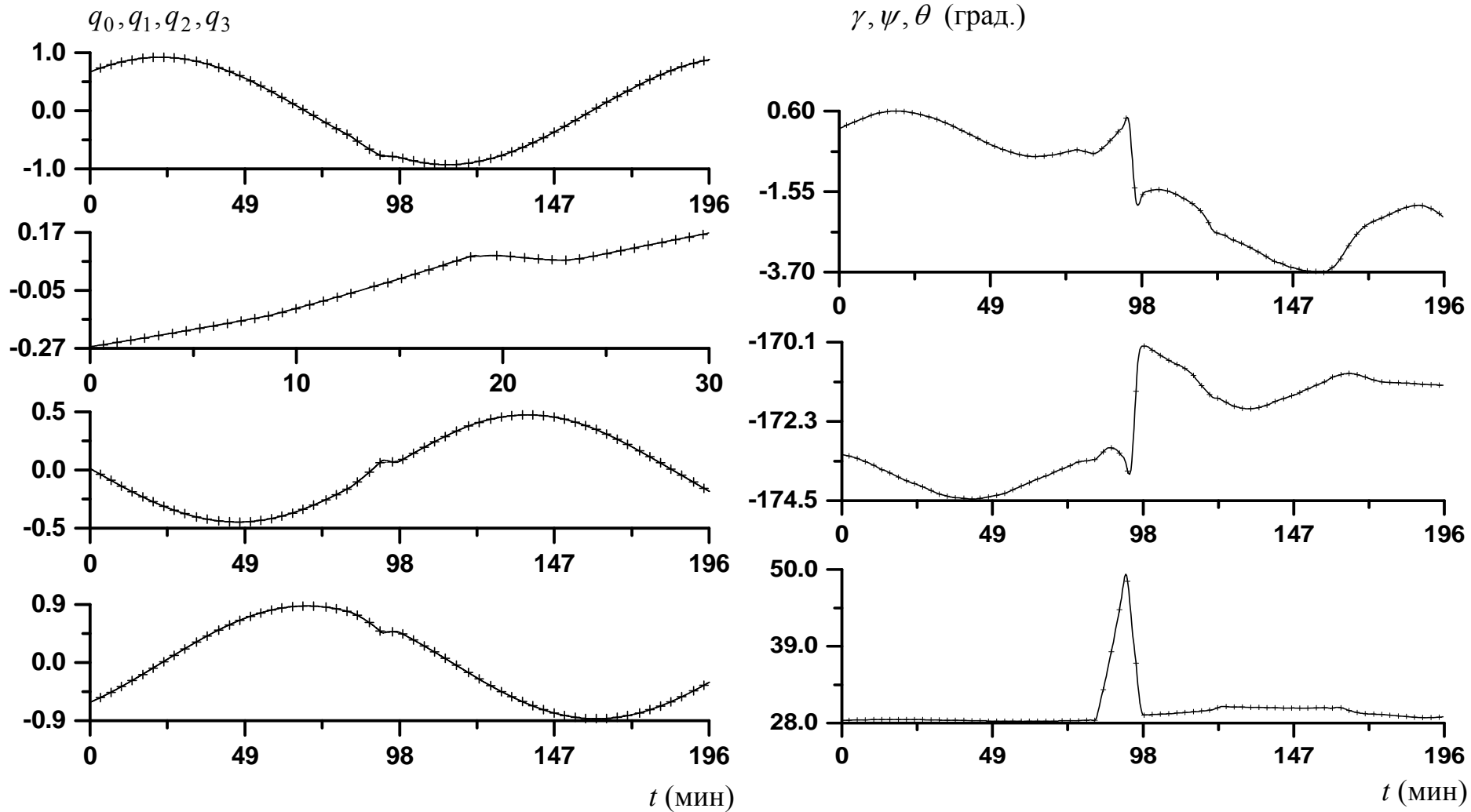


Рис. 2а. Отрезок 1' (подинтервал 1). Момент  $t = 0$  соответствует: 10:09:30 ДМВ 13.02.2009.

Слева – компоненты кватерниона, справа – углов.

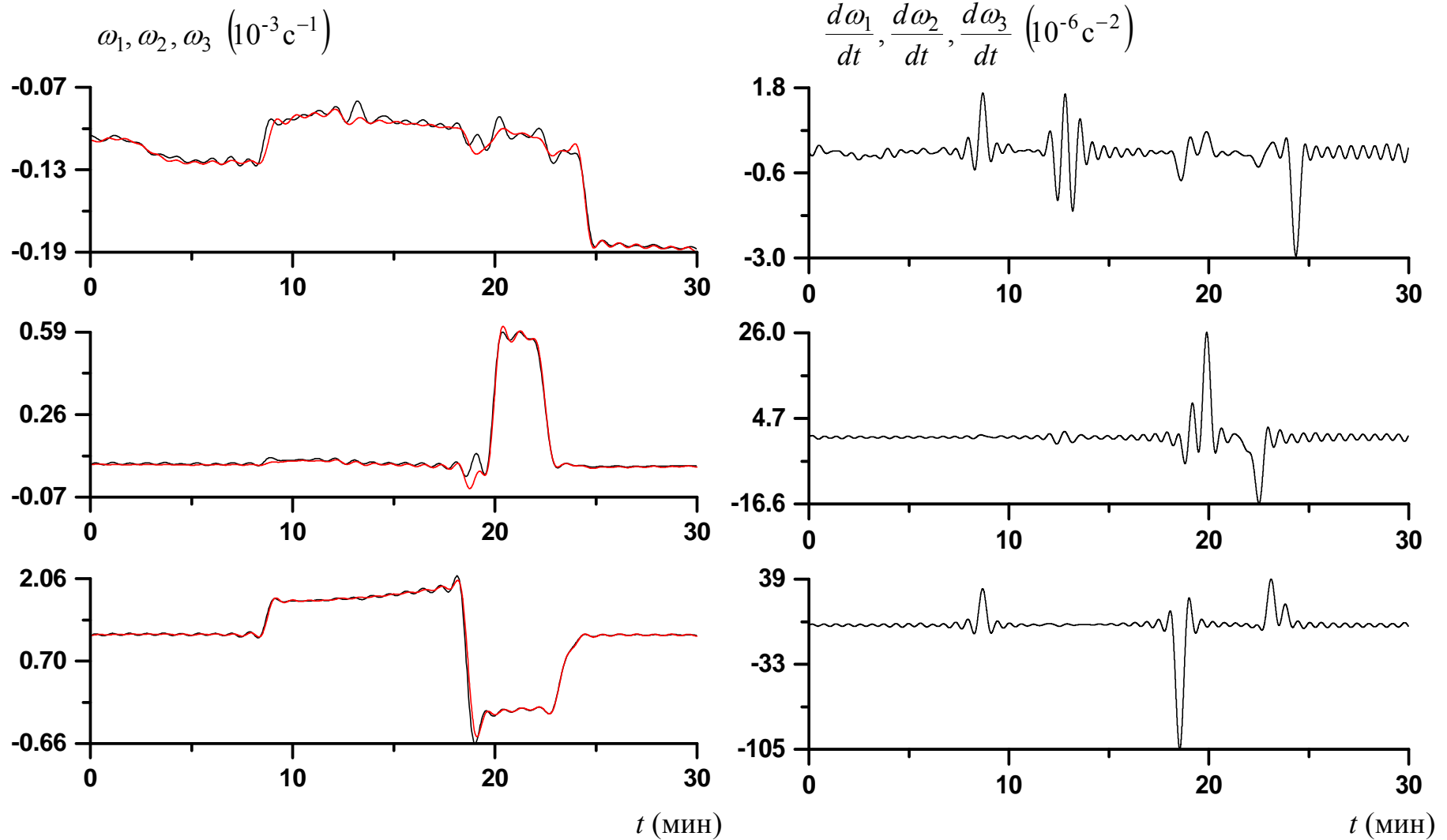


Рис. 2б. Отрезок 1' (подинтервал 1). Момент  $t = 0$  соответствует: 10:09:30 ДМВ 13.02.2009.

Слева – компоненты угловой скорости, справа – углового ускорения.



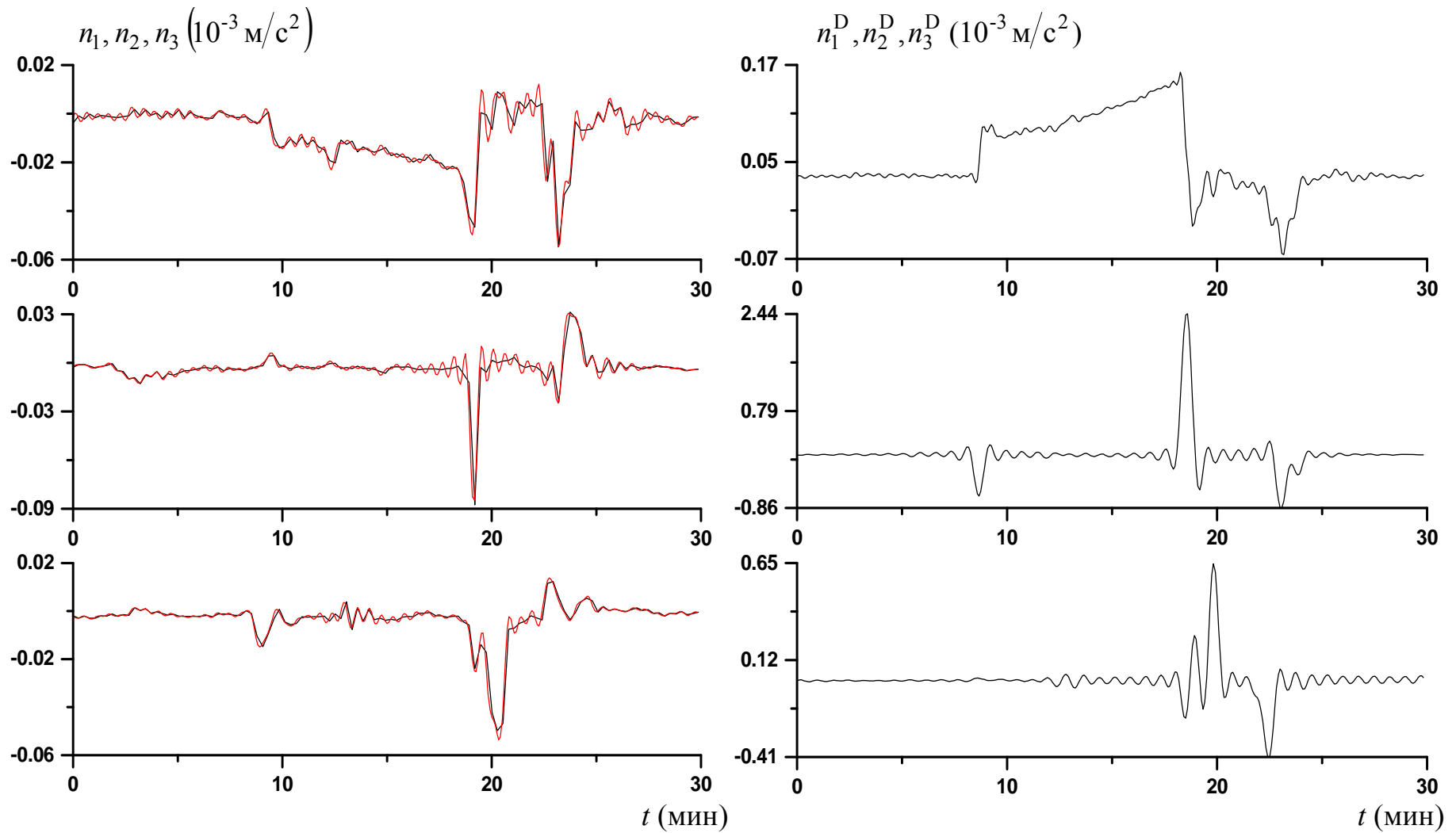
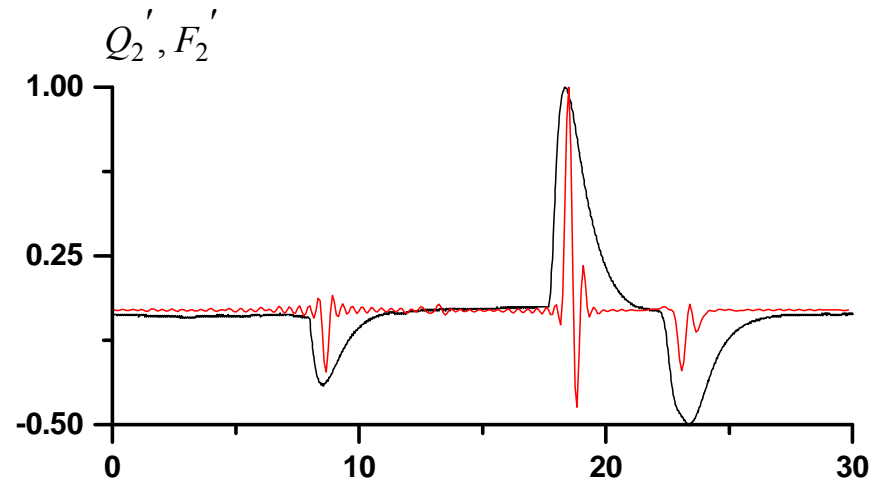
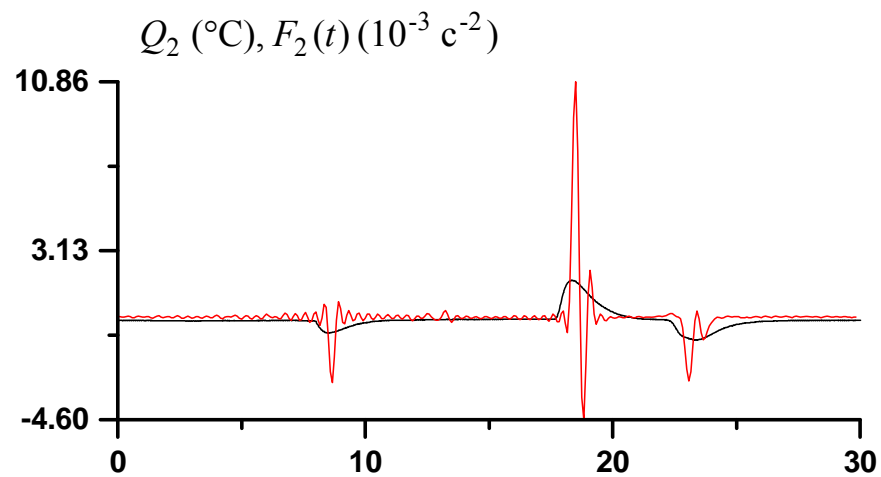
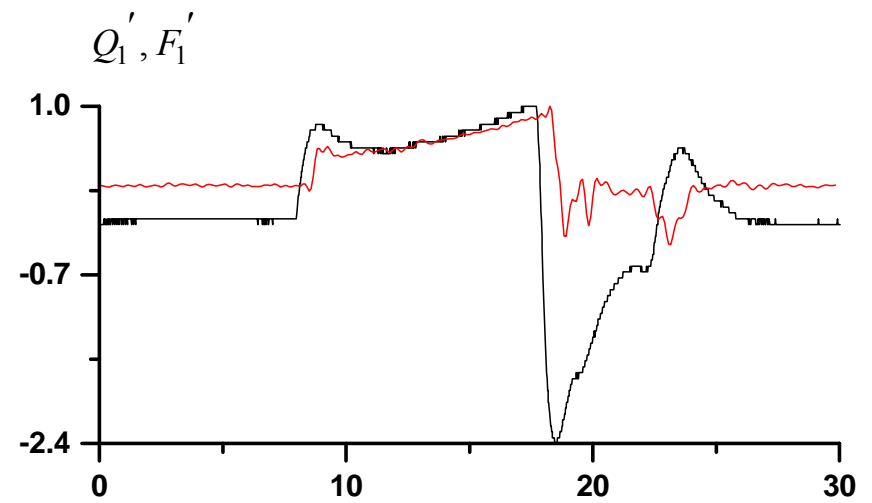
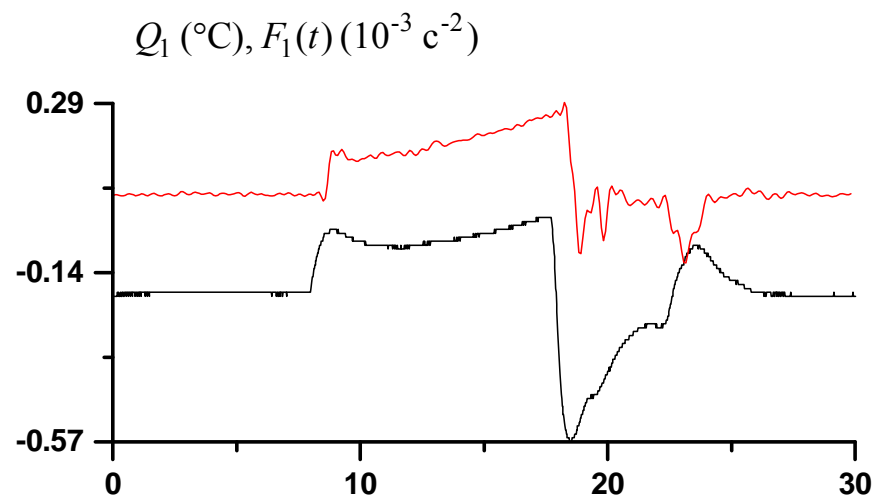


Рис. 2в. Отрезок 1' (подинтервал 1). Момент  $t = 0$  соответствует: 10:09:30 ДМВ 13.02.2009. Слева – данные MAMS и их аппроксимация, справа – данные MAMS, пересчитанные в точку установки ДАКОНа.



$t$  (МИН)

$t$  (МИН)

Рис. 2г. Отрезок 1' (подинтервал 1). Момент  $t = 0$  соответствует: 10:09:30 ДМВ 13.02.2009.

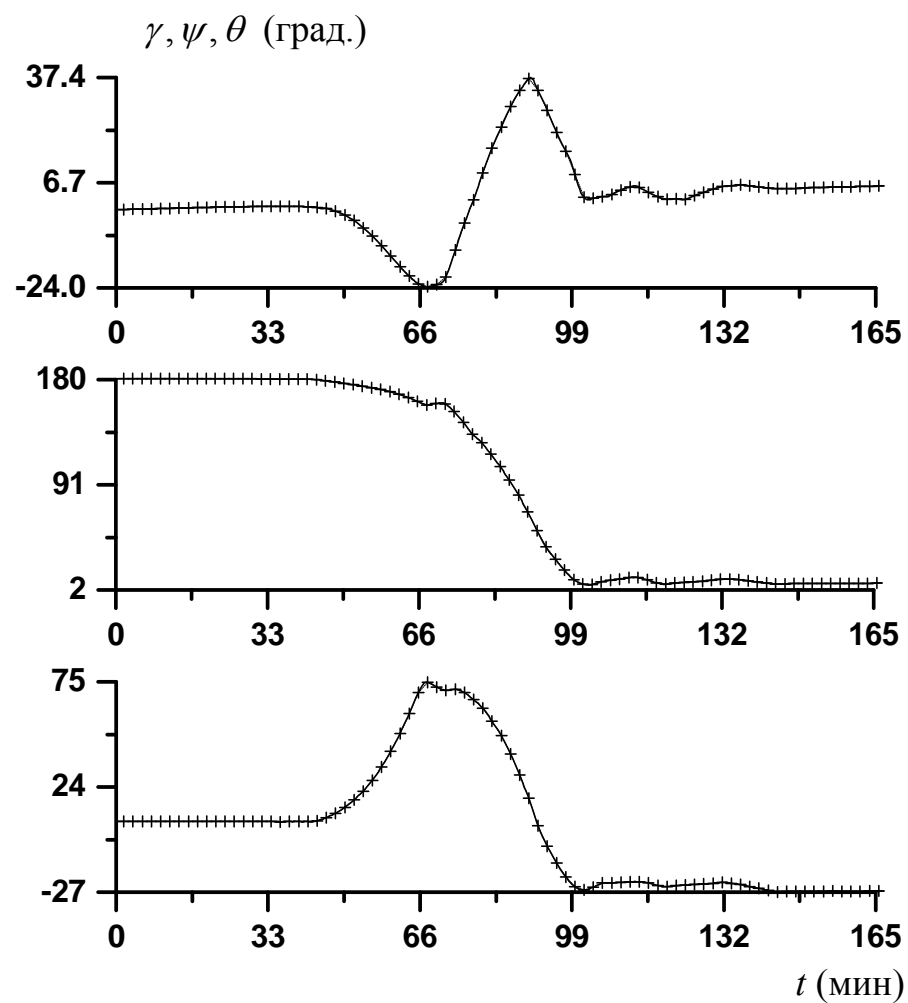
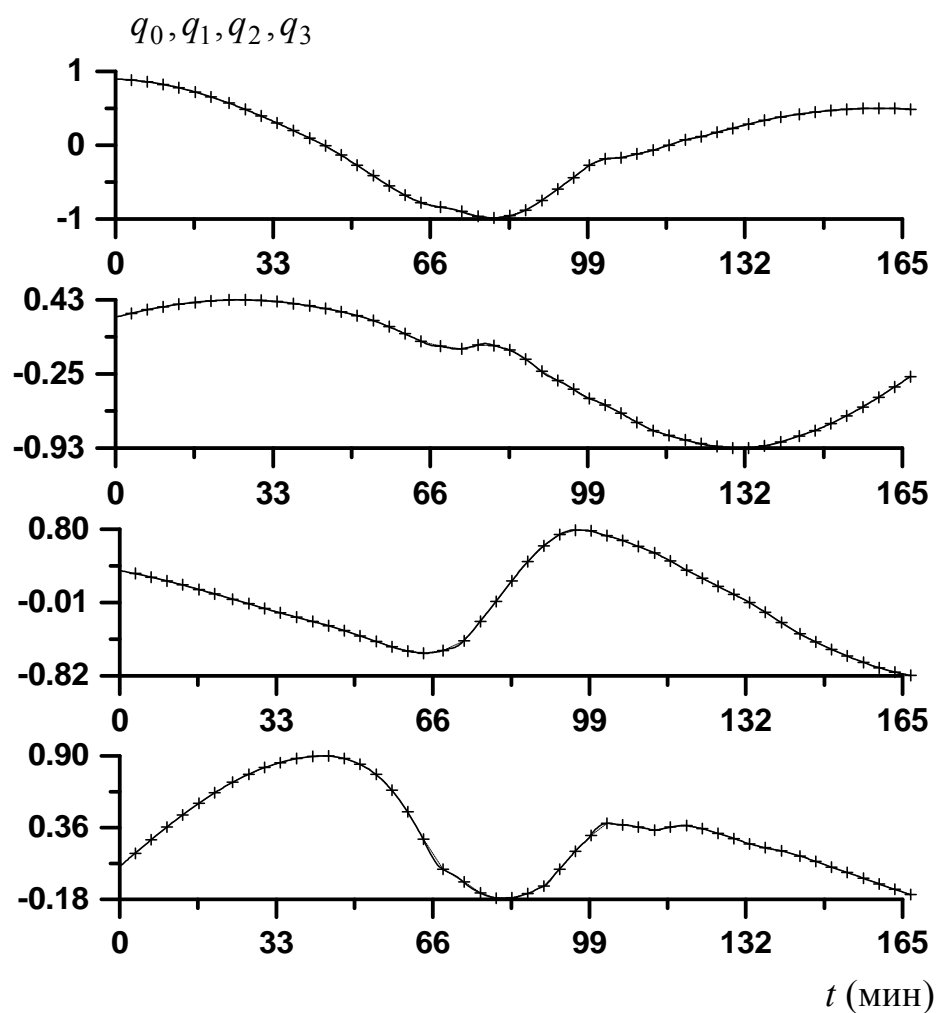


Рис. 3а. Отрезок 2. Момент  $t = 0$  соответствует: 23:36:40 ДМВ 17.03.2009.

Слева – компоненты кватерниона, справа – углов.

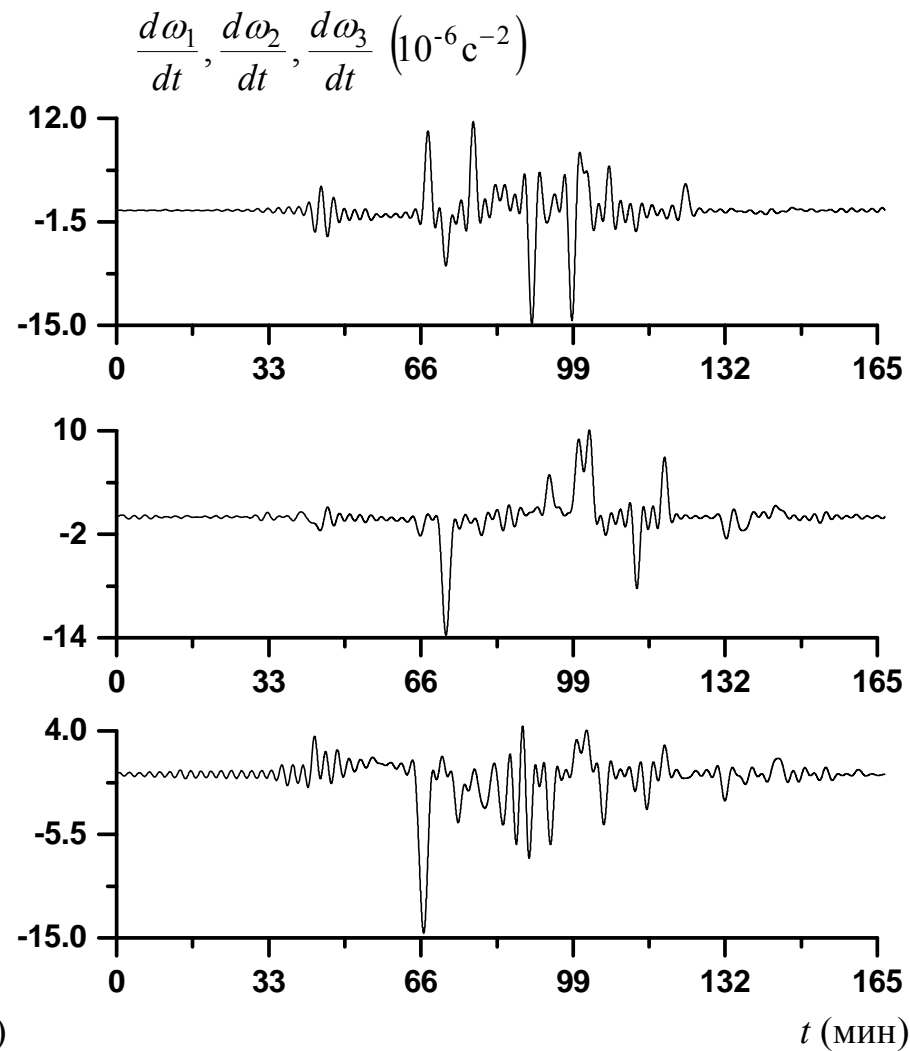
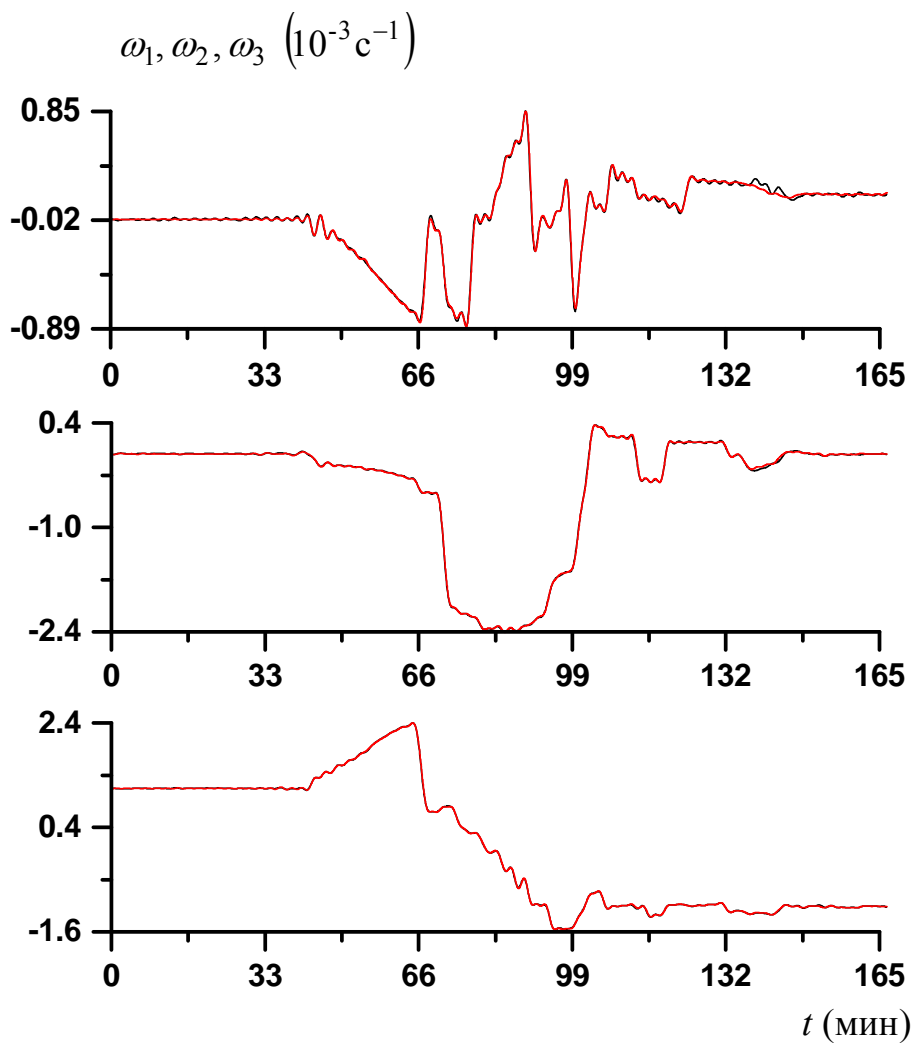


Рис. 3б. Отрезок 2. Момент  $t = 0$  соответствует: 23:36:40 ДМВ 17.03.2009.  
Слева – компоненты угловой скорости, справа – углового ускорения.

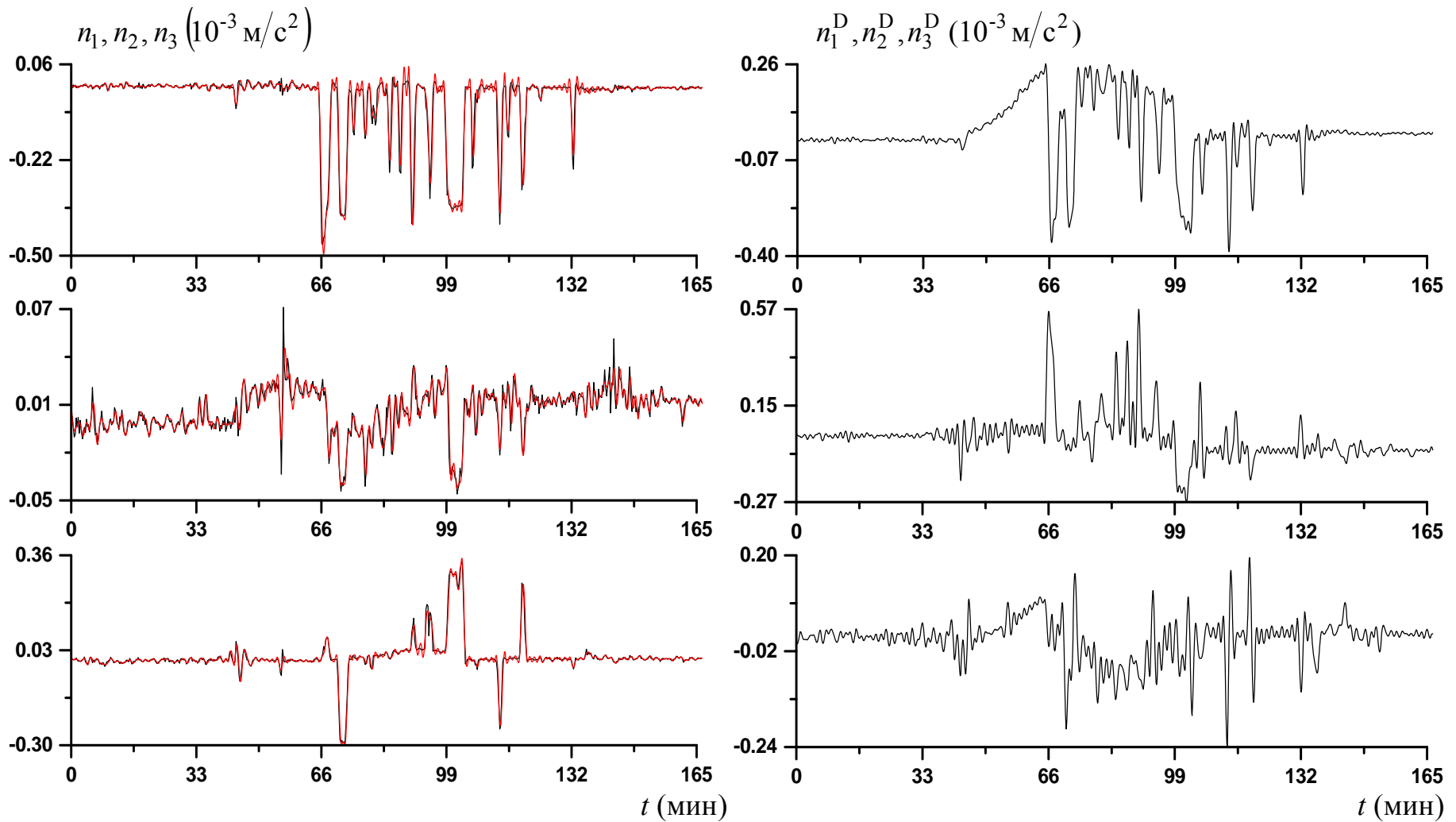
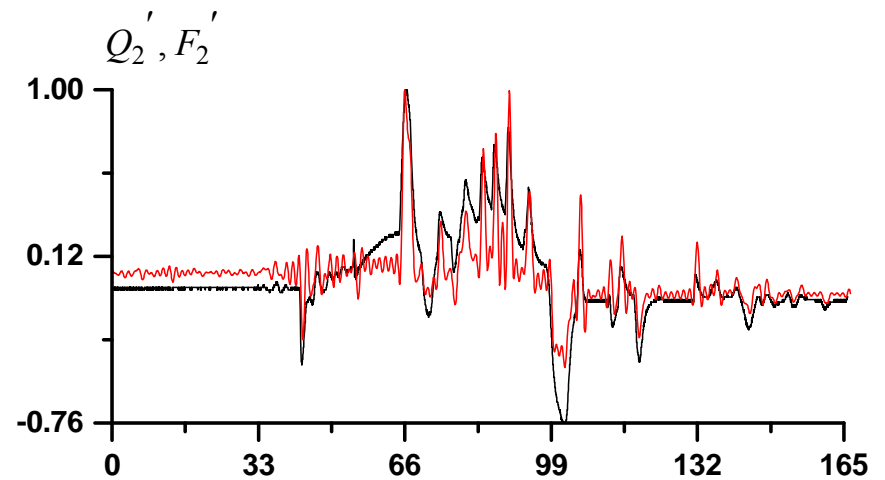
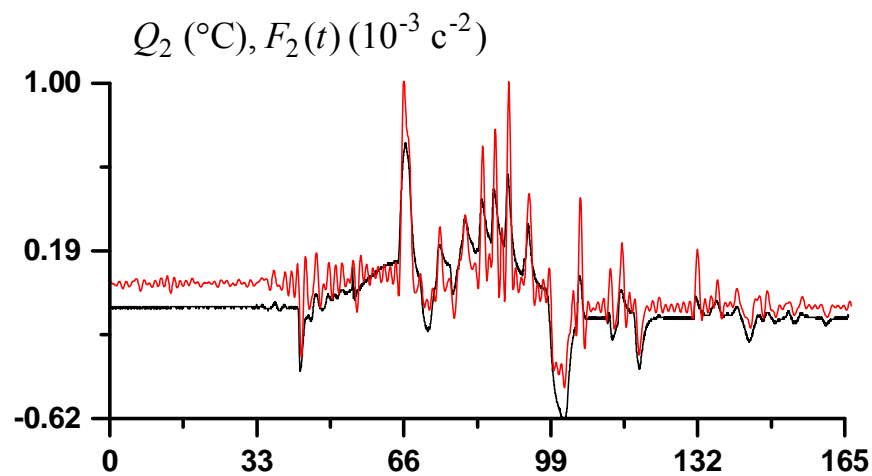
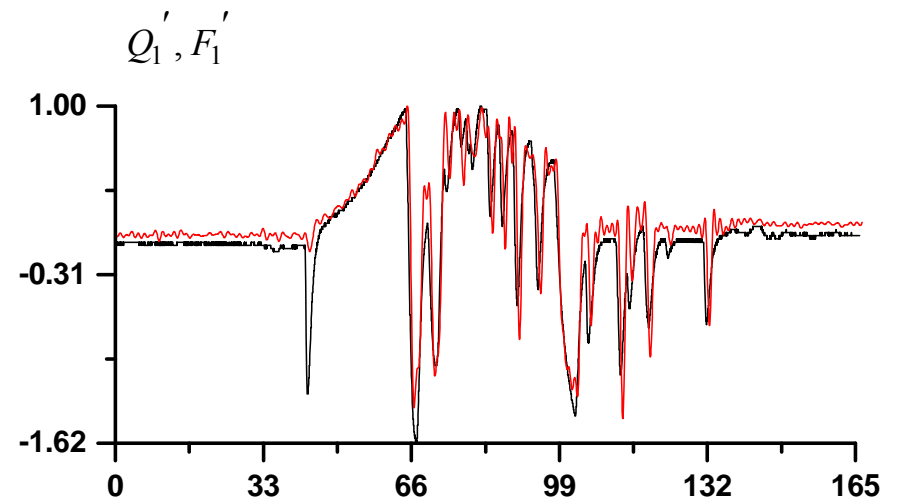
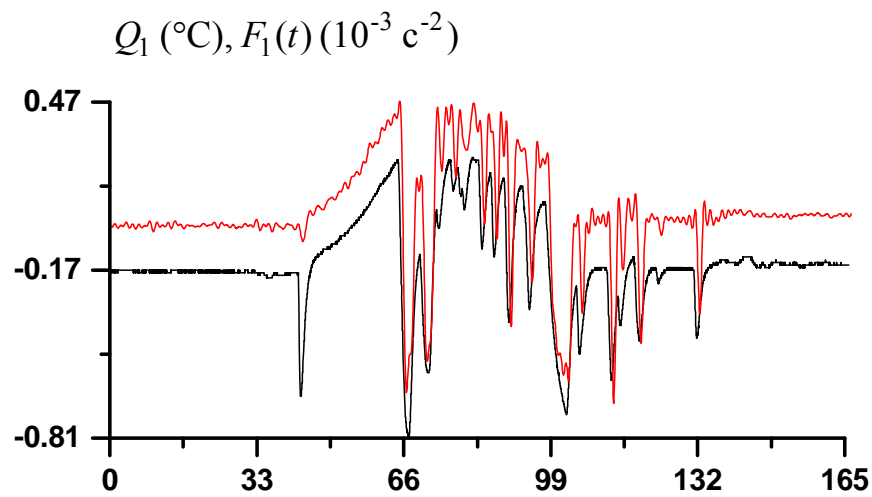


Рис. 3в. Отрезок 2 (подинтервал 1). Момент  $t = 0$  соответствует: 23:36:40 ДМВ 17.03.2009. Слева – данные MAMS и их аппроксимация, справа – данные MAMS, пересчитанные в точку установки ДАКОНа.



$t$  (МИН)

$t$  (МИН)

Рис. 3з. Отрезок 2. Момент  $t = 0$  соответствует: 23:36:40 ДМВ 17.03.2009.

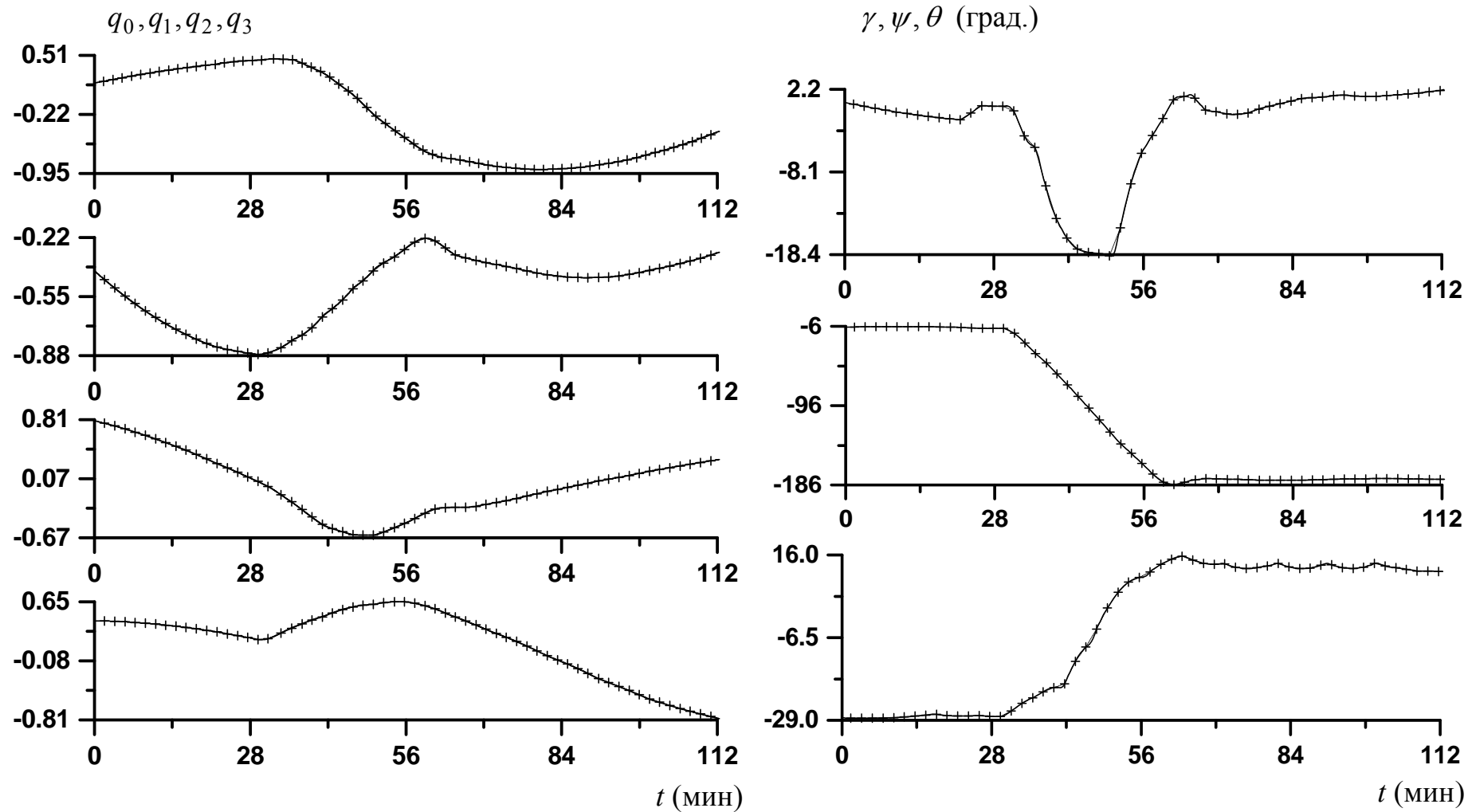


Рис. 4а. Отрезок 3. Момент  $t = 0$  соответствует: 21:10:00 ДМВ 25.03.2009.

Слева – компоненты кватерниона, справа – углов.

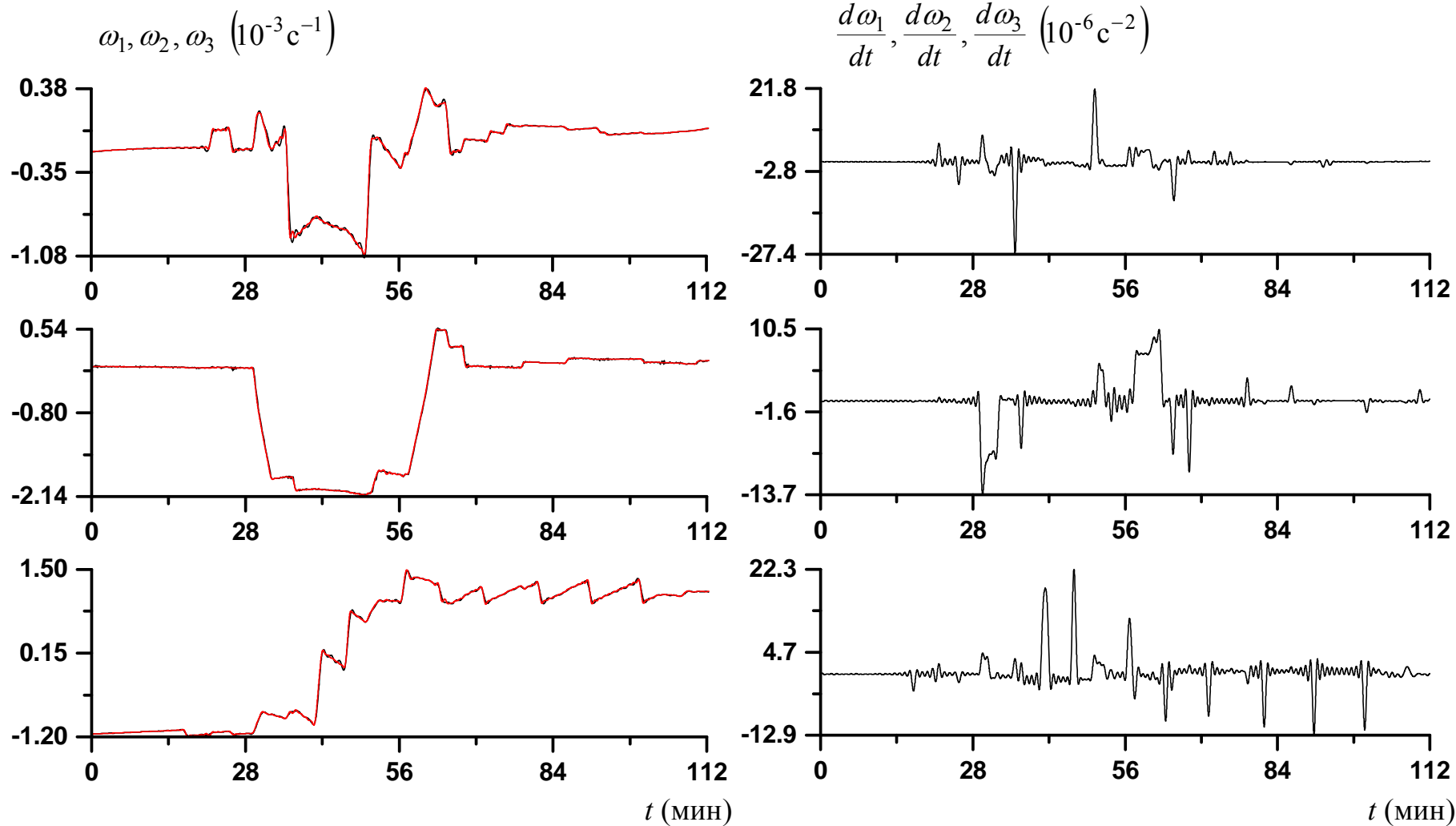


Рис. 4б. Отрезок 3. Момент  $t = 0$  соответствует: 21:10:00 ДМВ 25.03.2009.

Слева – компоненты угловой скорости, справа – углового ускорения.



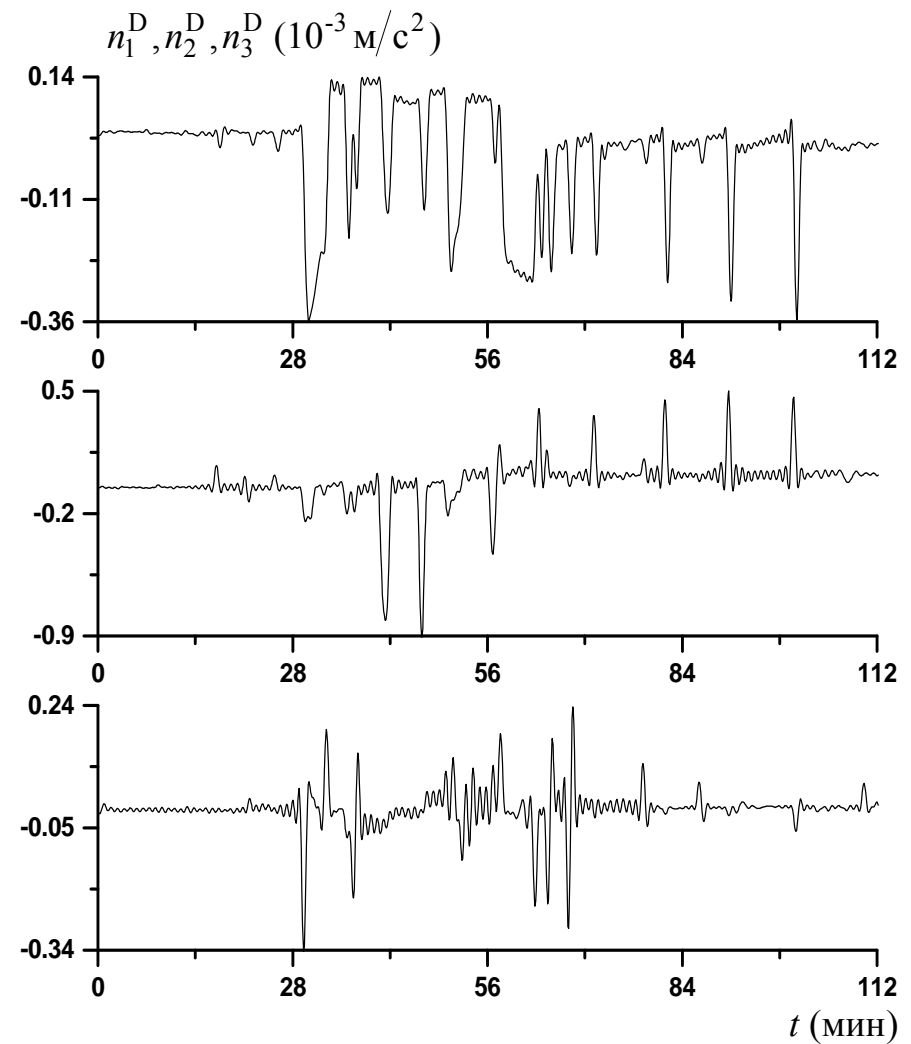
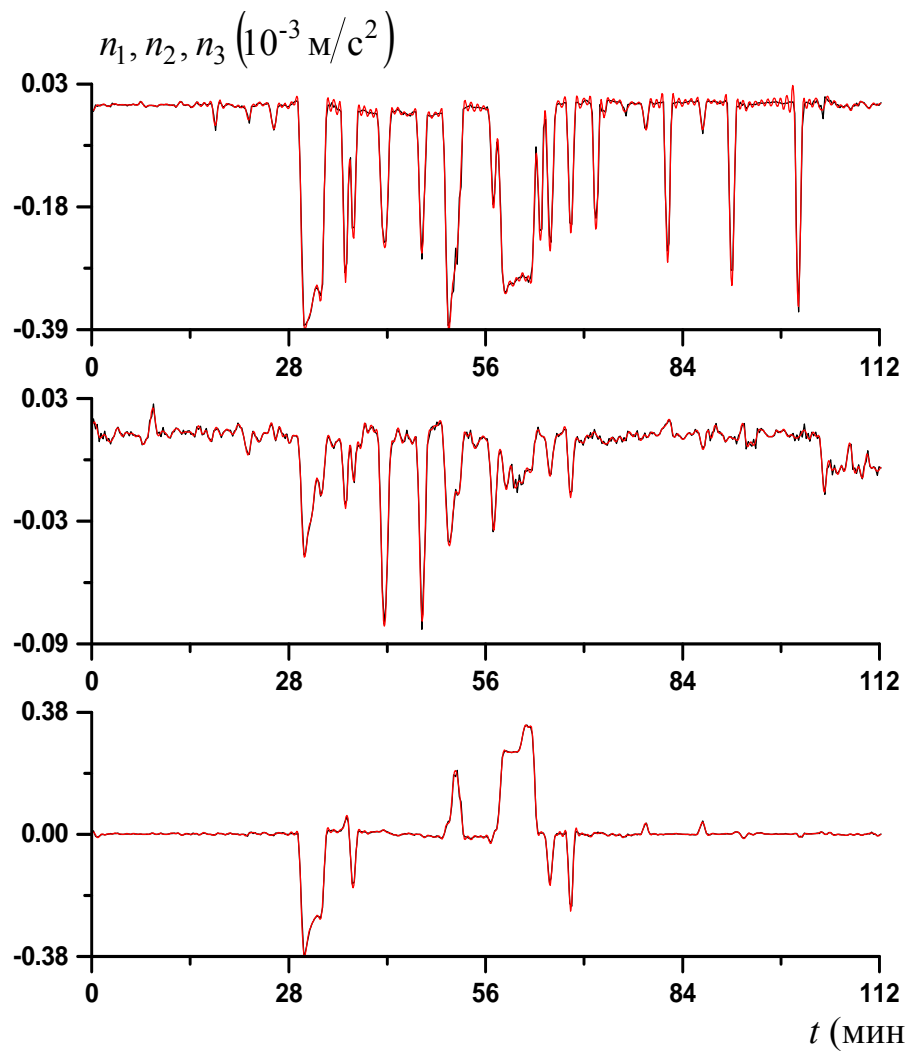
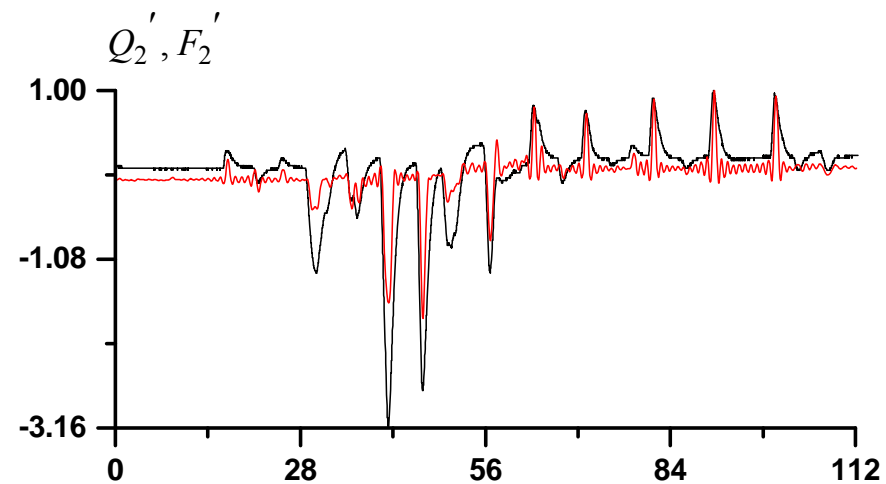
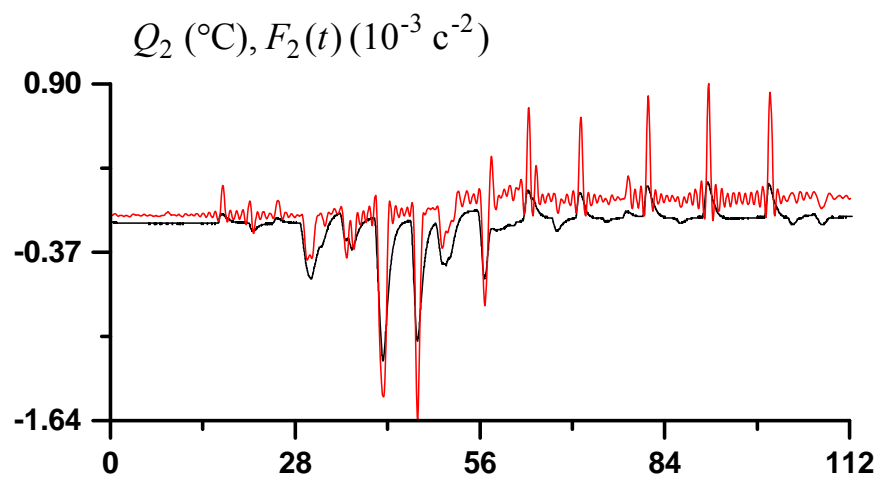
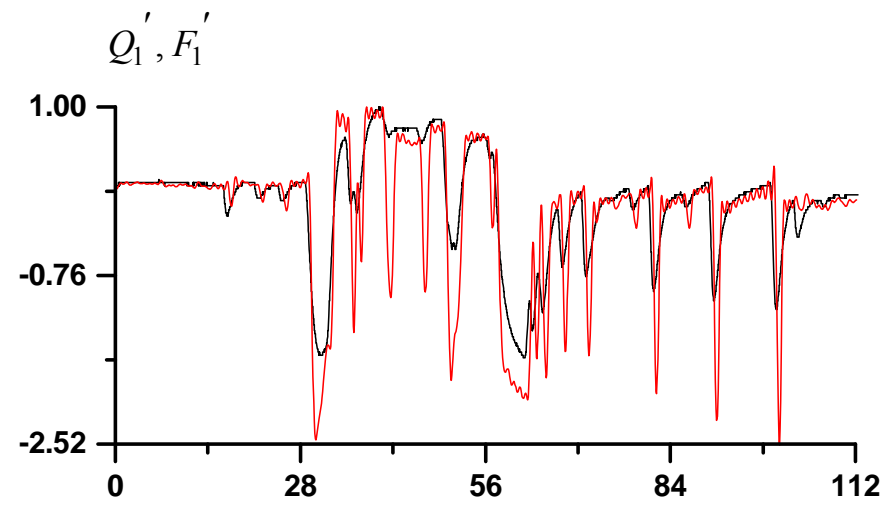
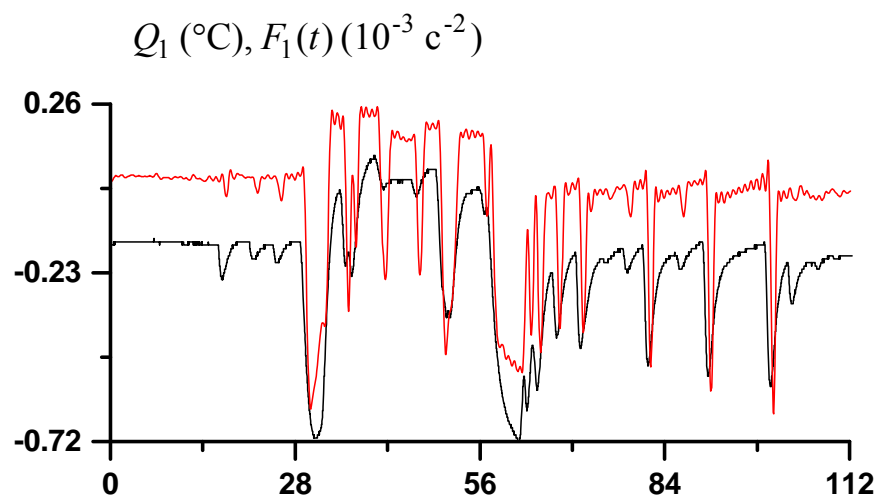


Рис. 4в. Отрезок Отрезок 3. Момент  $t = 0$  соответствует: 21:10:00 ДМВ 25.03.2009. Слева – данные МАМS и их аппроксимация, справа – данные МАМS, пересчитанные в точку установки ДАКОНа.



$t$  (МИН)

$t$  (МИН)

Рис. 4г. Отрезок 3. Момент  $t = 0$  соответствует: 21:10:00 ДМВ 25.03.2009.