

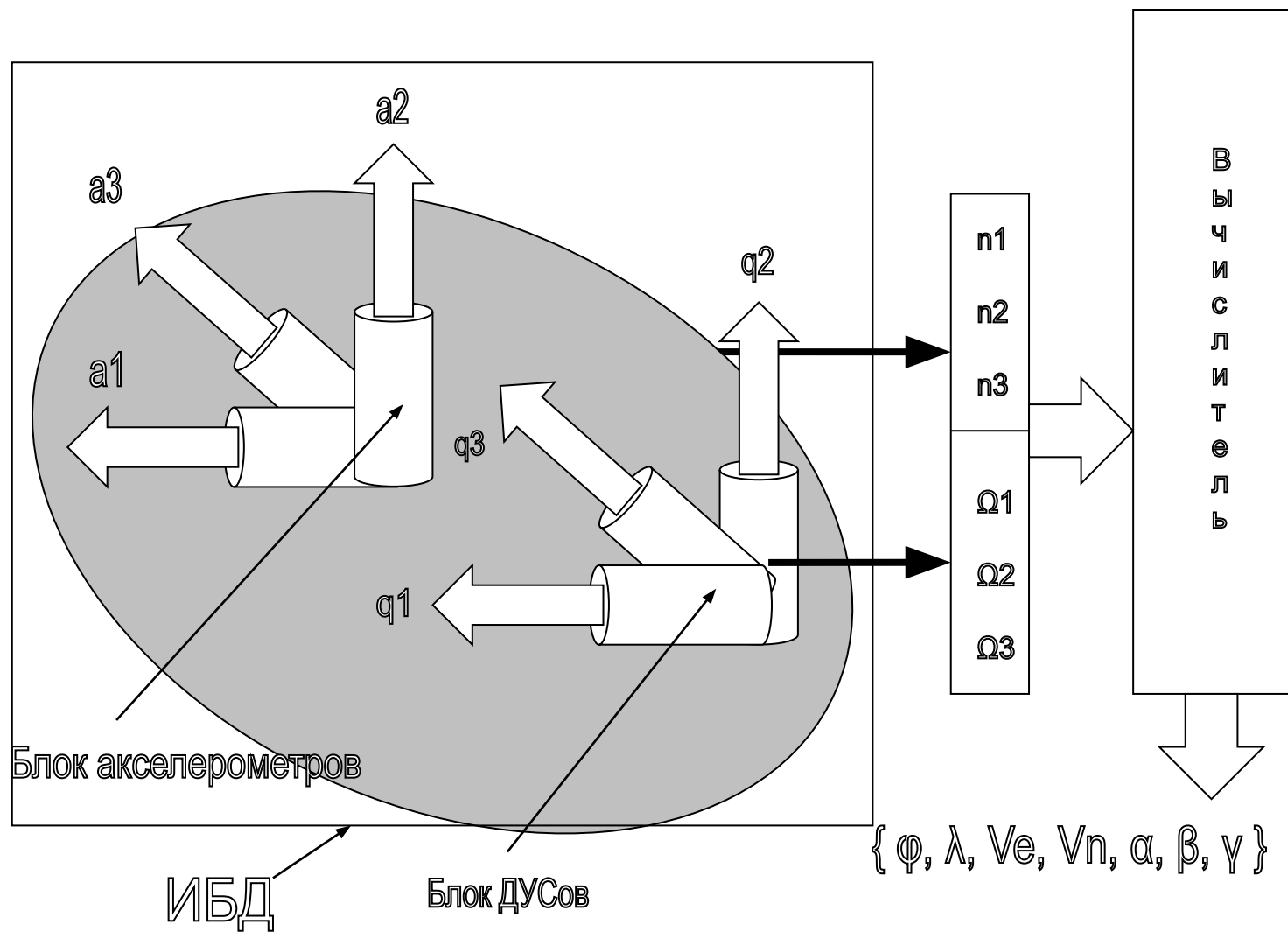
# **Дипломная работа**

**«Моделирование точности работы БИНС в контуре беспилотного ЛА»**

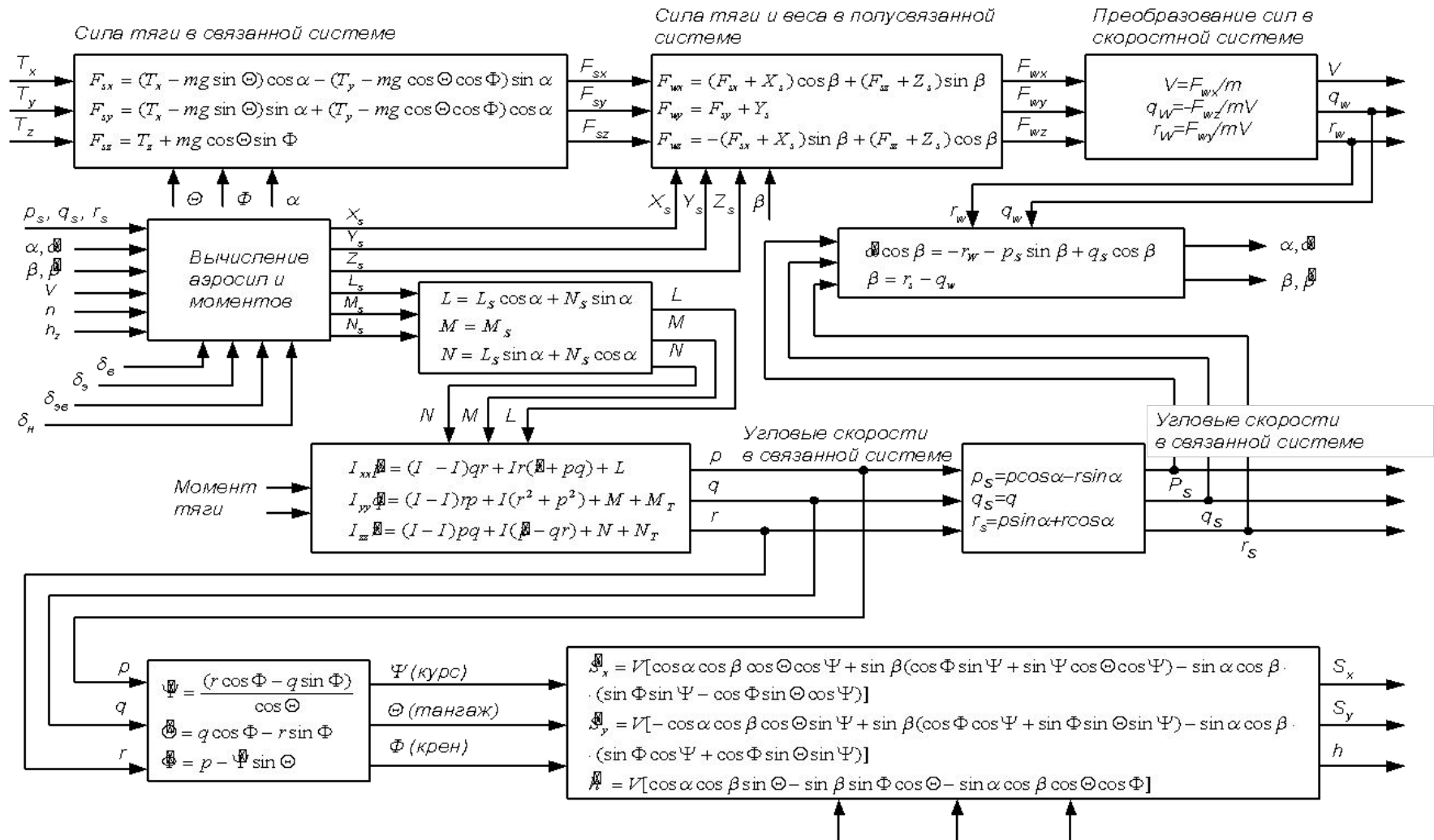
Дипломант: Арыкова А. Ю.

Руководитель работы: профессор Костюков В. М.

# Структура БИНС



# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ЛА



# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БИНС

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} VE \\ VN \\ Vz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_z + 2 \cdot u_z & -(\omega_y + 2 \cdot u_y) \\ -(\omega_z + 2 \cdot u_z) & 0 & \omega_x \\ \omega_y + 2 \cdot u_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} VE \\ VN \\ Vz \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} NX \\ NY \\ NZ \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \\ \\ \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi \\ \lambda \\ H \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} \frac{VN}{\rho_1 + H} \\ VE \\ (\rho_2 + H) \cdot \cos(\varphi) \\ 1 \end{bmatrix}}{1} = \begin{bmatrix} -\omega_x \\ \omega_y \\ Vz \end{bmatrix} \end{array} \right.$$

# Уравнения Пуассона

$$\frac{d[C_{ij}]}{dt} = \begin{bmatrix} 0 & \Omega_z & -\Omega_y \\ -\Omega_z & 0 & \Omega_x \\ \Omega_y & -\Omega_x & 0 \end{bmatrix} \cdot [C_{ij}] + [C_{ij}] \cdot \begin{bmatrix} 0 & \Omega_3 & -\Omega_2 \\ -\Omega_3 & 0 & \Omega_1 \\ \Omega_2 & -\Omega_1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\Omega_x = \omega_x$$

$$\Omega_y = \omega_y + u_y$$

$$\Omega_z = \omega_z + u_z$$

$$\begin{bmatrix} NX \\ NY \\ NZ \end{bmatrix} = [C_{ij}] \cdot \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix}$$

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БИНС

$$\rho_1 = \frac{a \cdot (1 - e^2)}{(1 - e^2 \cdot \sin^2(\varphi))^{3/2}}$$

$$\rho_2 = \frac{a}{(1 - e^2 \cdot \sin^2(\varphi))^{1/2}}$$

**a = 6378245 м** – экваториальный  
полу диаметр (эллипсоид Красовского

ПЗ-  
42) ;  
**e<sup>2</sup> = 0.0066934126** – эксцентриситет.

$$u_y = u \cdot \cos(\varphi)$$

$$u_z = u \cdot \sin(\varphi)$$

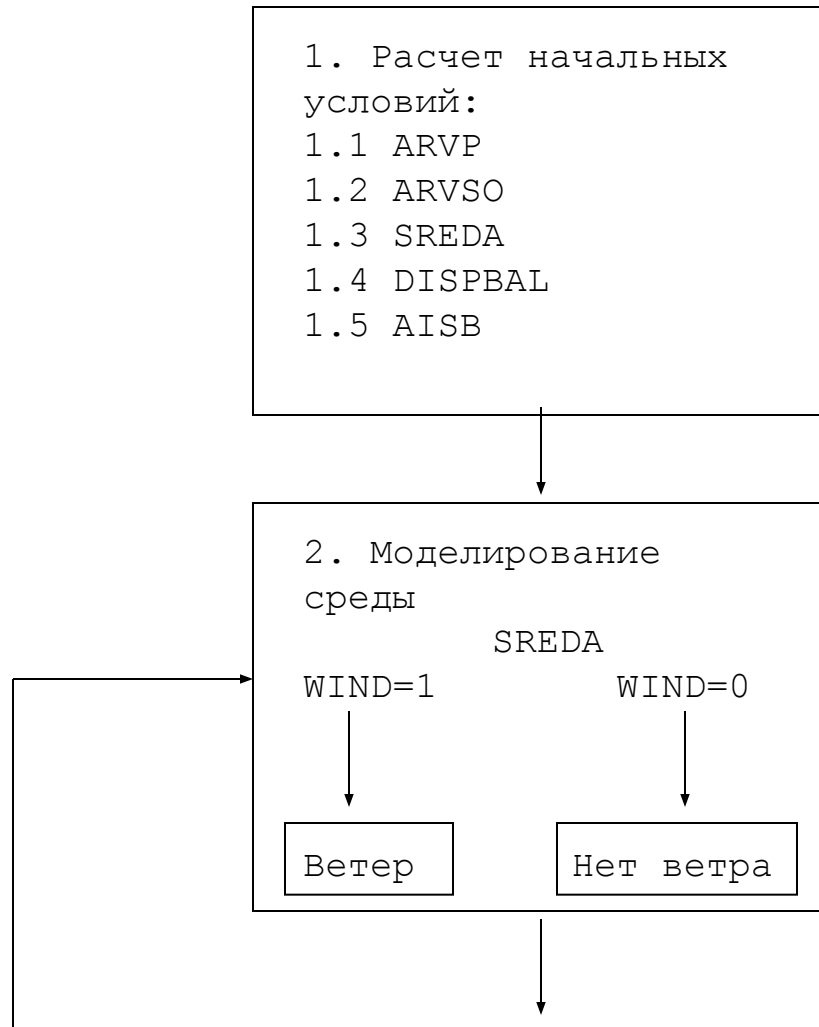
$$u = 7292115 \cdot 10^{-11} \text{ рад./с.}$$

$$\omega_x = -\dot{\varphi}$$

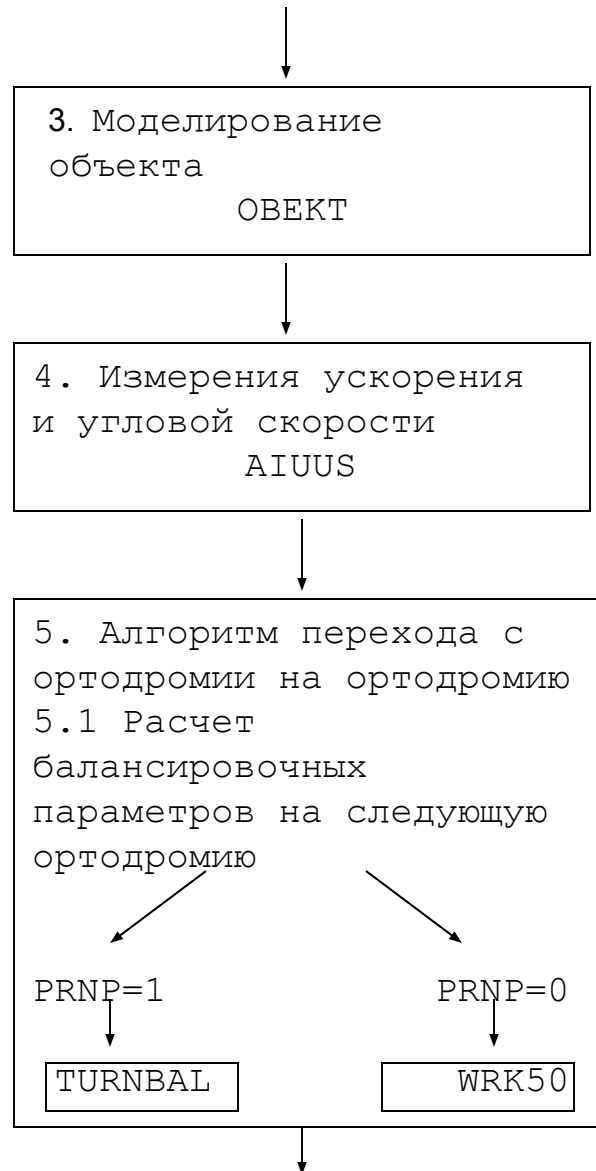
$$\omega_y = \dot{\lambda} \cdot \cos(\varphi)$$

$$\omega_z = \dot{\lambda} \cdot \sin(\varphi)$$

# Алгоритм программы

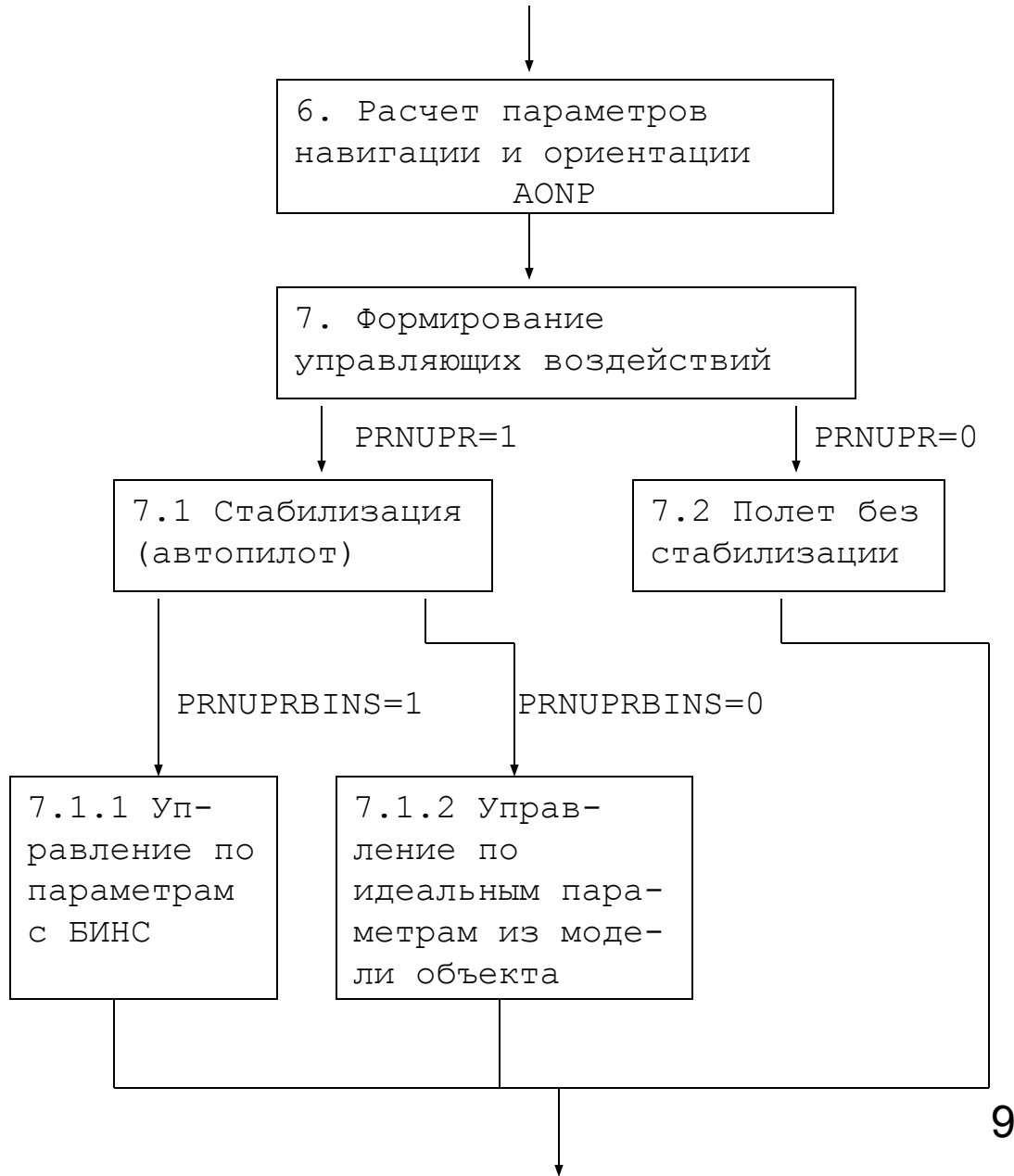


# Алгоритм программы

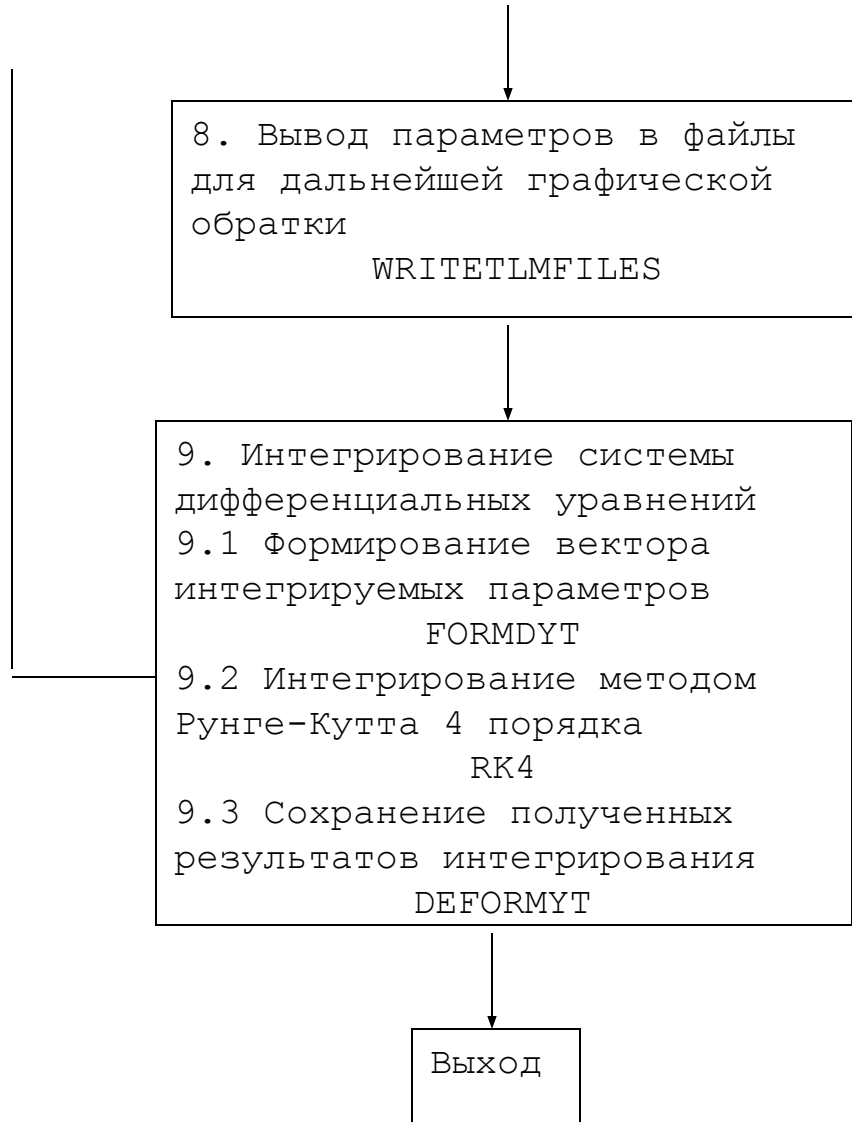




# Алгоритм программы



# Алгоритм программы



# МОДЕЛЬ ОШИБОК

## БИНС

$$\begin{cases} B_{x\Pi} = W_{ax} + k_{ax}f_x + U_{az}f_y - U_{ay}f_z + v_x(n) \\ B_{y\Pi} = W_{ay} - U_{az}f_x + k_{ay}f_y + U_{ax}f_z + v_y(n) \\ B_{z\Pi} = W_{az} + U_{ay}f_x - U_{ax}f_y + k_{az}f_z + v_z(n), \end{cases}$$

$$\begin{cases} \varepsilon_{\mathcal{H}\bar{H}} = O_{\mathcal{H}x} + k_{\mathcal{H}z} + U_{\mathcal{H}y} - U_{\mathcal{H}x} + \eta(n) \\ \varepsilon_{\mathcal{H}\bar{Y}} = O_{\mathcal{H}z} - U_{\mathcal{H}x} + \omega_{\mathcal{H}y} + k_{\mathcal{H}x} + U_{\mathcal{H}z} + \eta(n) \\ \varepsilon_{\mathcal{H}\bar{Z}} = O_{\mathcal{H}y} + U_{\mathcal{H}x} + \omega_{\mathcal{H}x} - U_{\mathcal{H}z} + k_{\mathcal{H}z} + \eta(n) \end{cases}$$

# МОДЕЛЬ ОШИБОК

## БИНС

$$v_i(n) = C_{Ai} \chi_{Ai}(n) + d_{Ai} v_i(n-1)$$

где  $i = x, y, z$

$$C_{Ai} = \sigma_{Ai} \sqrt{1 - \rho_{Ai}^2} = 0,003 \quad / \quad ^2$$

$$d_{Ai} = \rho_{Ai} = e^{-2\pi f_{Ai} \Delta t_{Ai}} = 0,00000015$$

$$\eta_{Bi}(n) = C_{ii} \chi_i(n) + d \eta(n-1)$$

где  $i = x, y, z$

$$C_{Bi} = \sigma_{Bi} \sqrt{1 - \rho_{Bi}^2} \approx 0,00057 \quad 1/c =$$

$$d_{Bi} = \rho_{Bi} = e^{-2\pi f_{Bi} \Delta t_{Bi}} = 0,00187$$

# МОДЕЛЬ ОШИБОК

## БИНС

$$\begin{cases} \omega_{x\Pi} = \omega_X + \varepsilon_{x\Pi} \\ \omega_{y\Pi} = \omega_Y + \varepsilon_{y\Pi} \\ \omega_{z\Pi} = \omega_Z + \varepsilon_{z\Pi} \end{cases}$$

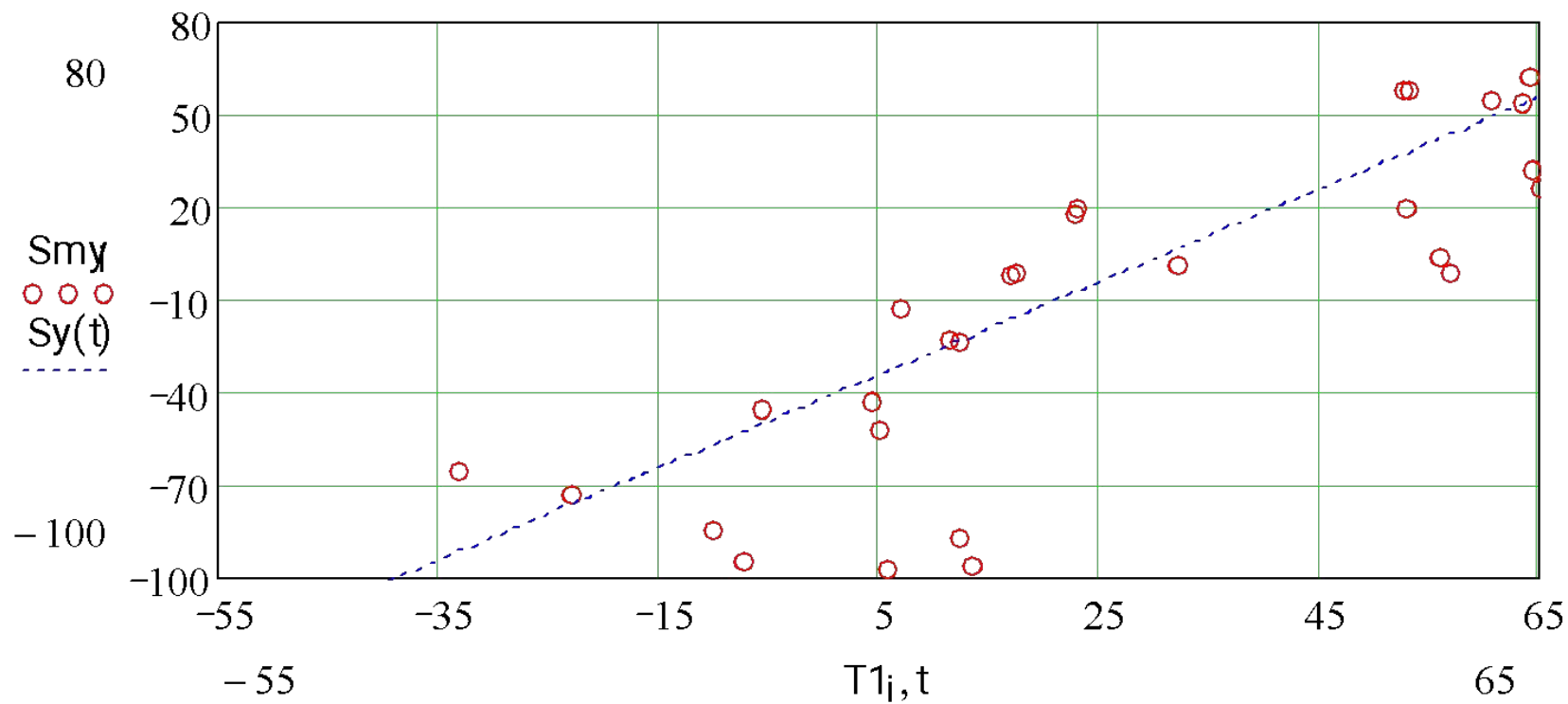
$$\begin{cases} a_{x\Pi} = f_X + B_{x\Pi} \\ a_{y\Pi} = f_Y + B_{y\Pi} \\ a_{z\Pi} = f_Z + B_{z\Pi} \end{cases}$$

Оси	$O_1 X_1$	$O_1 Y_1$	$O_1 Z_1$
$O_1 X_\Pi$	1	$\phi_Z$	$-\phi_Y$
$O_1 Y_\Pi$	$-\phi_Z$	1	$\phi_X$
$O_1 Z_\Pi$	$\phi_Y$	$-\phi_X$	1

$$\begin{cases} f_X = a_{X_1} + \varphi_Z a_{Y_1} - \varphi_Y a_{Z_1} \\ f_Y = a_{Y_1} - \varphi_Z a_{X_1} + \varphi_X a_{Z_1} \\ f_Z = a_{Z_1} + \varphi_Y a_{X_1} - \varphi_X a_{Y_1} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \omega_X = \omega_{X_1} + \varphi_Z \omega_{Y_1} - \varphi_Y \omega_{Z_1} \\ \omega_Y = \omega_{Y_1} - \varphi_Z \omega_{X_1} + \varphi_X \omega_{Z_1} \\ \omega_Z = \omega_{Z_1} + \varphi_Y \omega_{X_1} - \varphi_X \omega_{Y_1} \end{cases}$$

# Температурная компенсация



# Результаты моделирования

Сравним результаты моделирования:

1) Движение объекта с возмущенной средой (с ветром), управление по данным с БИНС. БИНС с ошибками (без температурной компенсации)

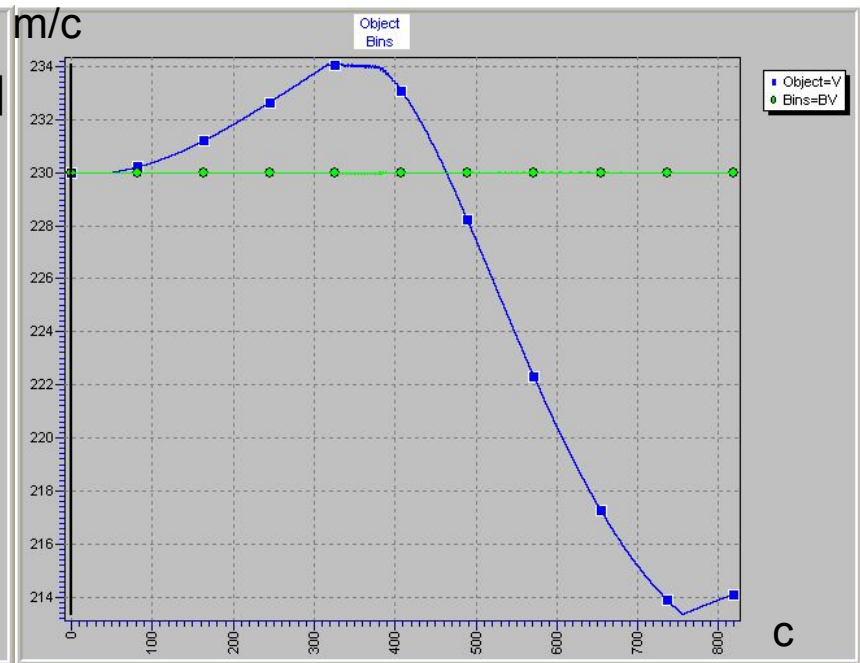
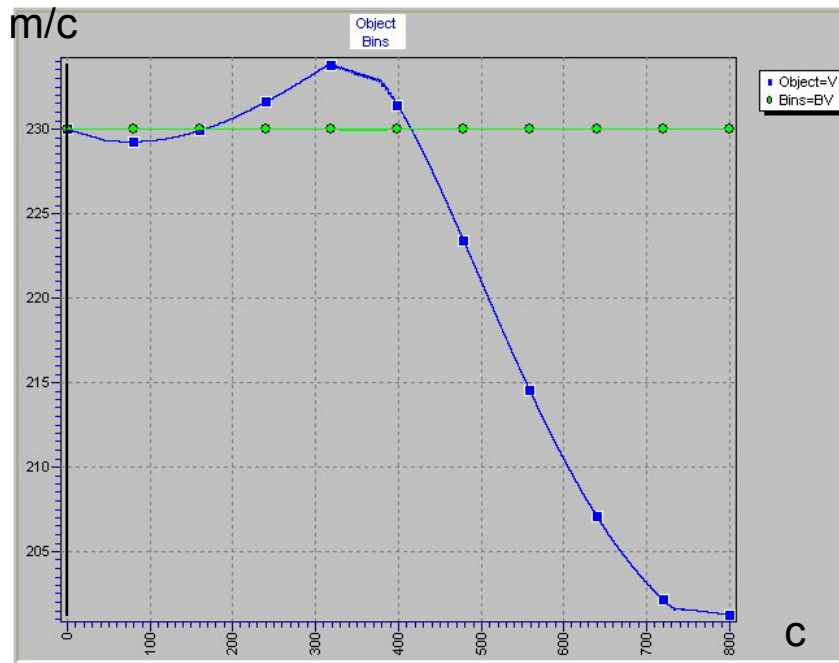
NENOL1POST=0.014649  
NENOL2POST=0.024414  
NENOL3POST=0.012878  
SIGMANENOL1=0.00473  
SIGMANENOL2=0.00839  
SIGMANENOL3=0.003967  
MONENOL1=0.00049  
MONENOL2=0.00049  
MONENOL3=0.00049  
NENOL1POSTGIR=0.000000024  
NENOL2POSTGIR=0.000000027  
NENOL3POSTGIR=0.000000005  
SIGMANENOLGIR1=0.000000008  
SIGMANENOLGIR2=0.000000002  
SIGMANENOLGIR3=0.000000007  
MONENOL1GIR=0.000072717  
MONENOL2GIR=0.000072717  
MONENOL3GIR=0.000072717

1) Движение объекта с возмущенной средой (с ветром), управление по данным с БИНС. БИНС с ошибками (с температурной компенсацией)

NENOL1POST=0.0  
NENOL2POST=0.0  
NENOL3POST=0.0  
SIGMANENOL1=0.00183  
SIGMANENOL2=0.00153  
SIGMANENOL3=0.00102  
MONENOL1=0.00049  
MONENOL2=0.00049  
MONENOL3=0.00049  
NENOL1POSTGIR=0.0  
NENOL2POSTGIR=0.0  
NENOL3POSTGIR=0.0  
SIGMANENOLGIR1=0.000000002  
SIGMANENOLGIR2=0.00000000049  
SIGMANENOLGIR3=0.00000000099  
MONENOL1GIR=0.000072717  
MONENOL2GIR=0.000072717  
MONENOL3GIR=0.000072717

# Результаты моделирования

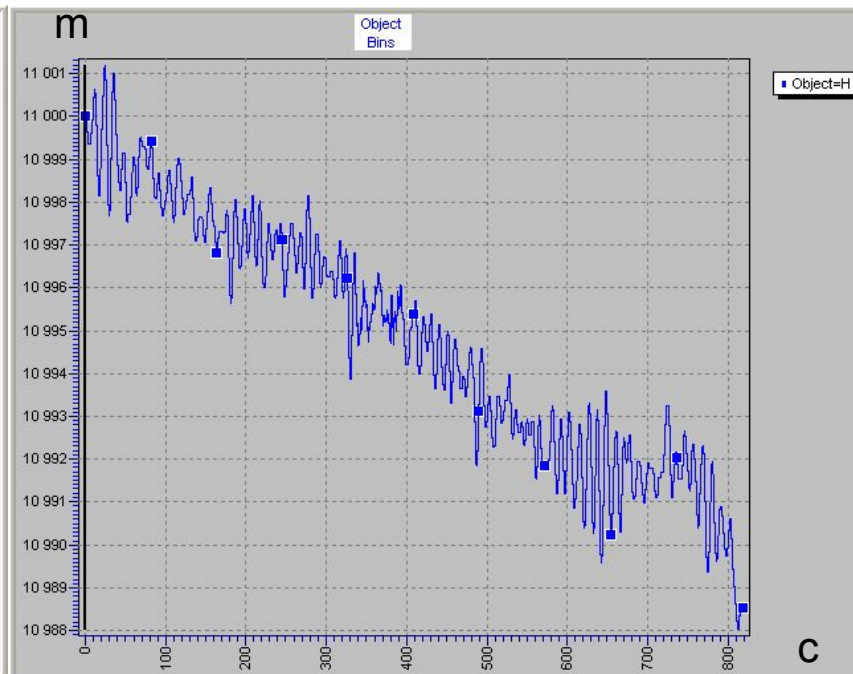
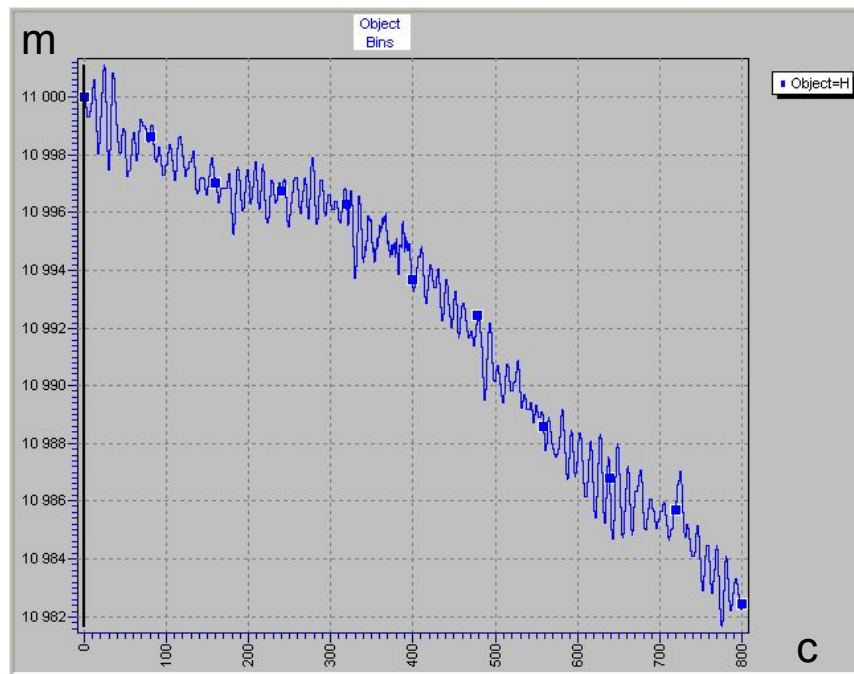
Сравнение по скорости:





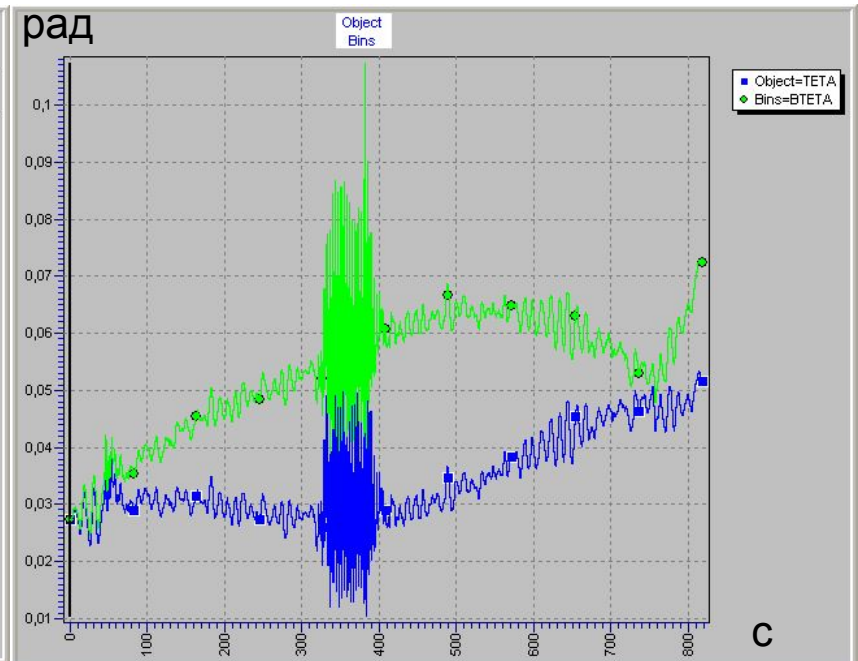
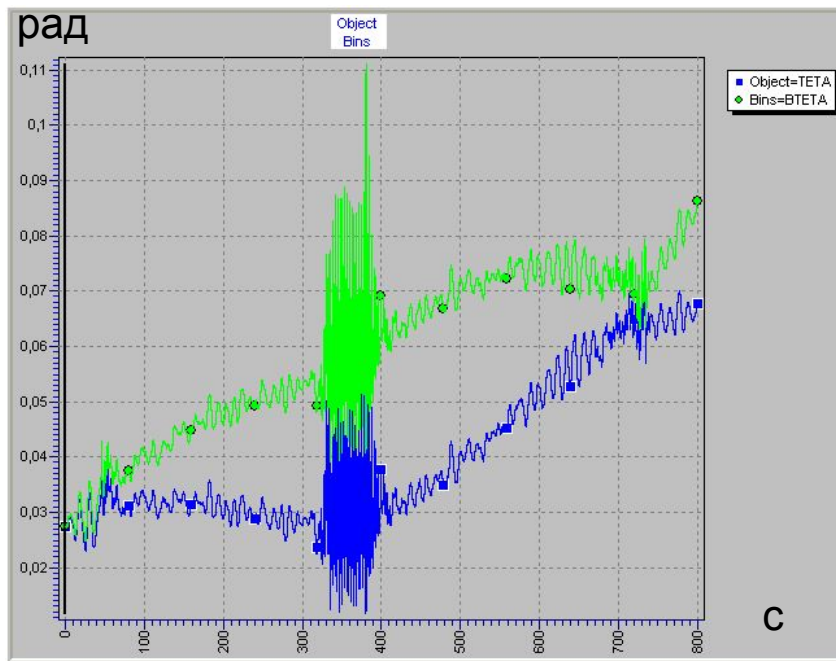
# Результаты моделирования

Сравнение по высоте:



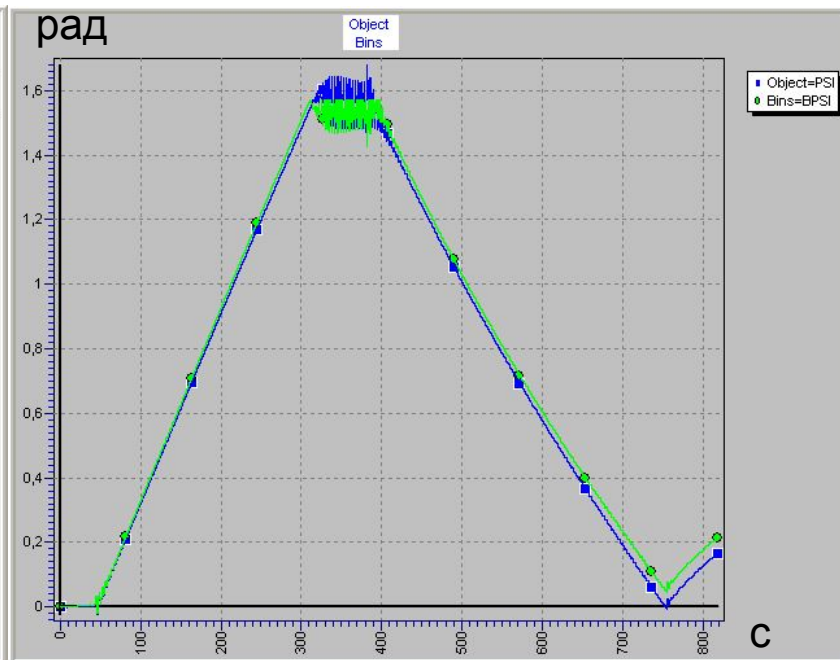
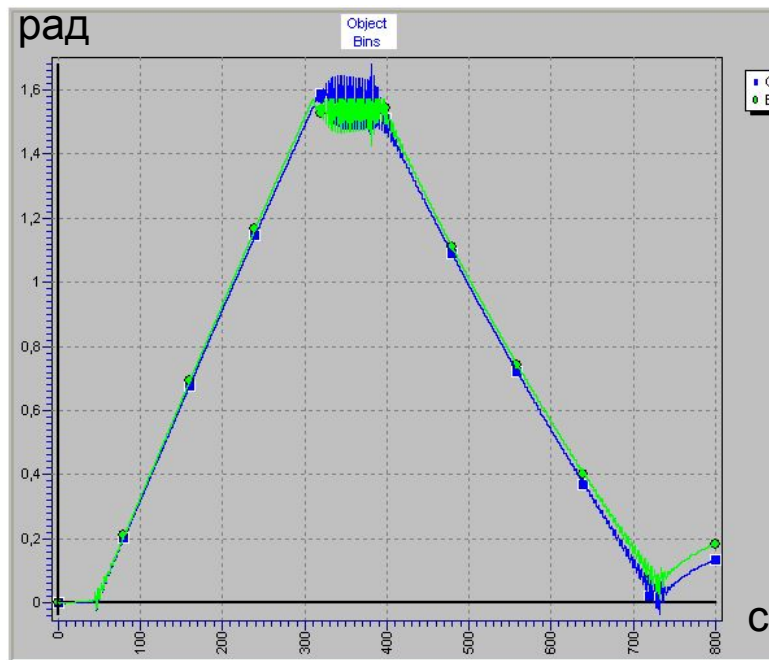
# Результаты моделирования

Сравнение по углу тангажа:



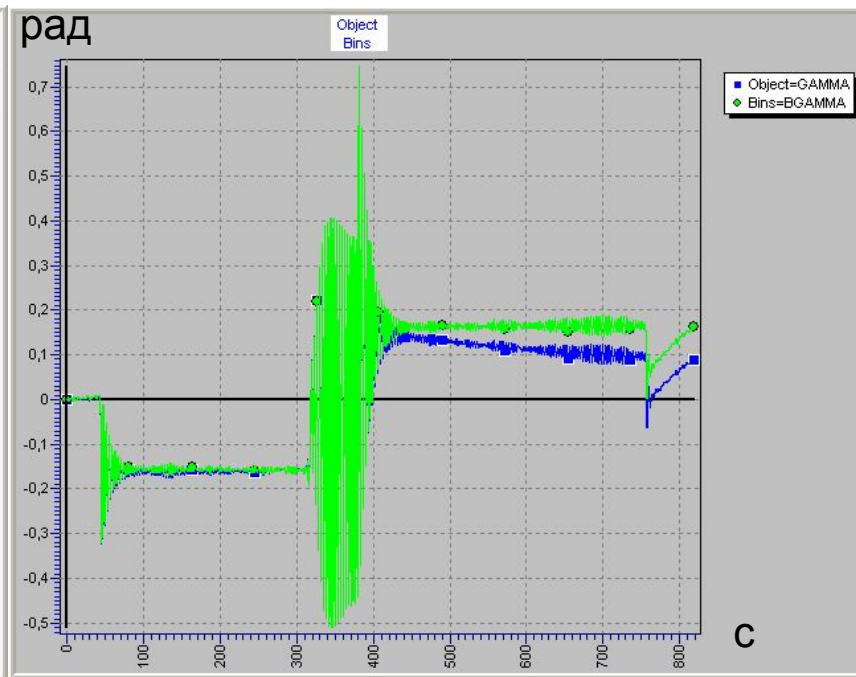
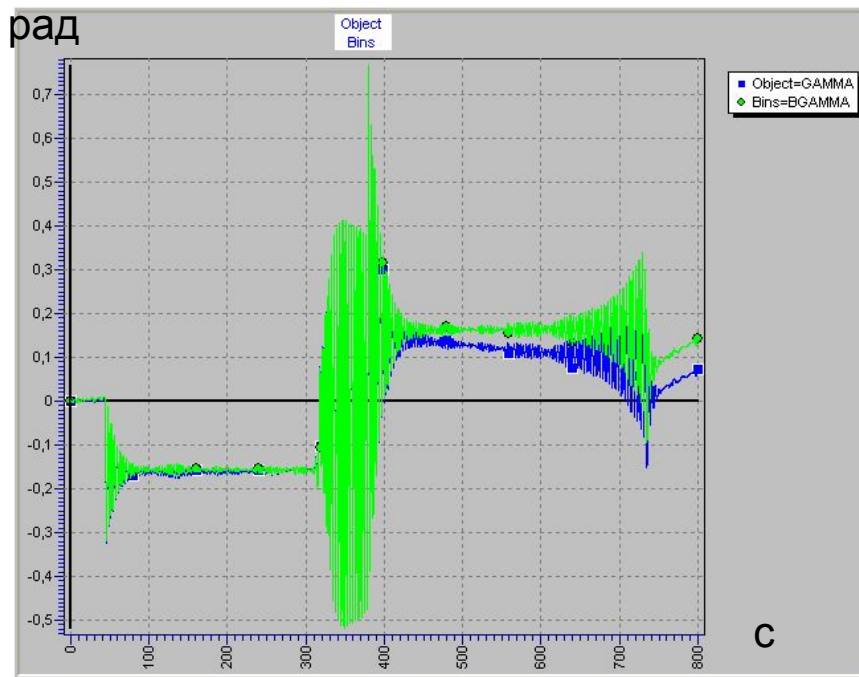
# Результаты моделирования

Сравнение по углу курса:



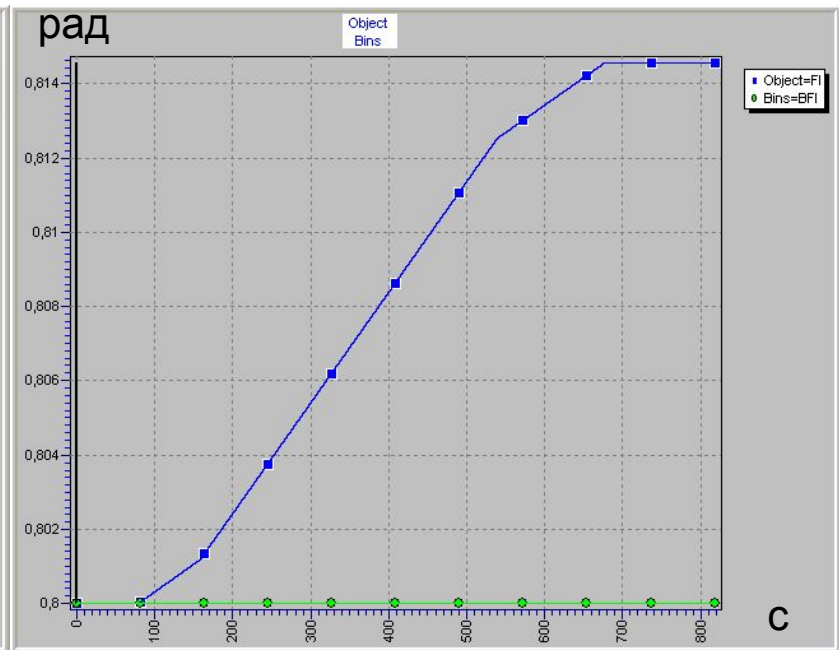
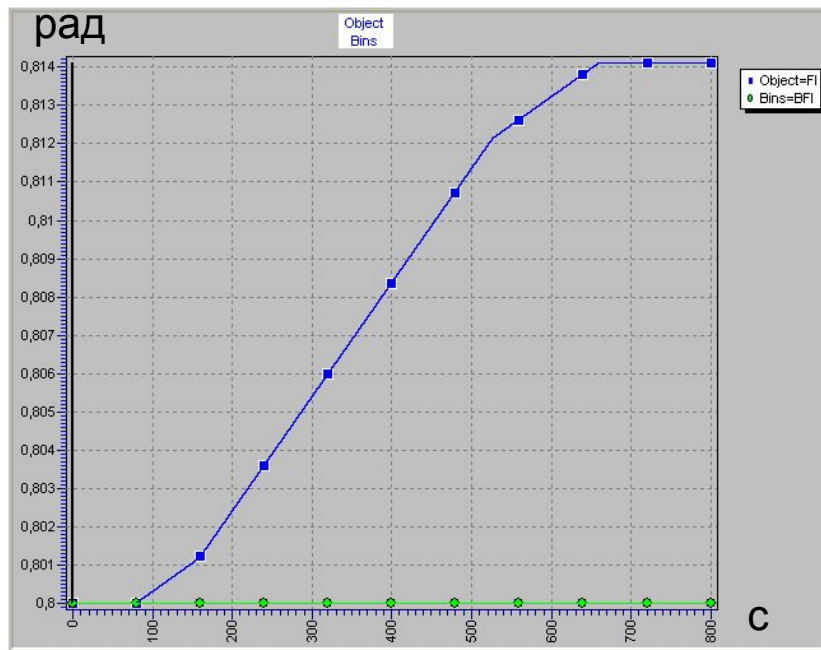
# Результаты моделирования

Сравнение по углу крена:



# Результаты моделирования

Сравнение по широте местоположения ЛА:



# Результаты моделирования

Сравнение по долготе местоположения ЛА

