



Национальный
исследовательский

**Томский
государственный
университет**

Вероятностное моделирование динамики астероидов и метеороидов со сложной структурой возмущений

Автор:
Самбаров Георгий Евгеньевич

Научный руководитель:
к.ф.-м.н., Галушина Т.Ю.

Актуальность проблемы

- Астероиды являются одной из самых больших подгрупп малых тел Солнечной системы, знания о динамической эволюции которых необходимы для понимания эволюции Солнечной системы в целом.
- Научные результаты исследования орбитальной эволюции некоторых астероидов с различными особенностями в движении могут быть использованы для решения актуальных задач астероидной опасности.

Научная новизна исследования состоит в следующем:

- Исследованы особенности орбитальной эволюции астероидов со сложной структурой возмущений с разным набором наблюдательного материала.
- Предложен способ оценки эффективности отбраковки наблюдений и введения весовых множителей. Способ позволяет качественно оценить отбраковку наблюдений и введение весовых множителей.
- Исследована орбитальная эволюция ряда объектов со сложной структурой возмущений оказывающих влияние на вероятностное отображение доверительных областей.
- Получены оценки хаотичности орбит астероидов 3200 Phaethon и (196256) 2003 EH1 с помощью параметра MEGNO.
- Исследована орбитальная эволюция метеороидных частиц потока Квадрантиды, выброшенных из астероида (196256) 2003 EH1, сближающихся с Юпитером и движущихся в окрестности резонансов с ним. Получена оценка хаотичности орбит метеороидных частиц потока Квадрантиды с помощью параметра MEGNO.

Цели и задачи

Цель работы – построение по данным измерений вероятностной орбитальной эволюции астероидов со сложной структурой возмущений, исследование резонансных взаимодействий астероидов с планетами и проявления хаотичности в движении объектов.

Для достижения этой цели решены следующие задачи.

- Рассмотрены способы отбраковки наблюдений и введения весовых множителей, и исследовано их влияния на характеристики получаемых доверительных областей возможных движений малых тел Солнечной системы.
- Построена численно-аналитической методики выявления апсидально-нодальных резонансов в движении астероидов и исследовано их влияние на движение астероидов со сложной структурой возмущений.
- Рассмотрено влияние различных слабых возмущающих факторов на вероятностную динамику астероидов со сложной структурой возмущений.
- Выявлены особенности динамической эволюции под действием вековых резонансов комплекса метеороидный поток Квадрантиды и астероид (196256) 2003 EH1.
- Исследована долговременная орбитальная эволюция астероида 3200 Phaethon, движущегося в окрестности резонанса $3/7$ с Венерой. Построена и исследована вероятностная область его движений. Получены оценки хаотичности орбит этих небесных тел Солнечной системы с помощью параметра MEGNO.

Положения, выносимые на защиту

- Предложенный способ оценивания эффективности отбраковки наблюдений и введения весовых множителей показал, что лучшей выборкой наблюдений и лучшим весовыми множителями является вариант, в котором определяемая доверительная область имеет меньшие размеры и не приводит к смещению НК-оценок.
- Разработанная для исследования движения астероидов численно-аналитическая методика выявления апсидально-нодальных резонансов существенно расширяет возможности анализа орбитальной эволюции объектов.
- Оценки влияния слабых возмущающих факторов на вероятностное описание движения астероидов, выполненные предложенным в диссертации способом на примере анализа вероятностной эволюции орбит ряда астероидов, показывают, что рассматриваемые возмущающие факторы приводят к малым смещениям доверительных областей и НК-оценок.
- Исследование орбитальной эволюции астероида (196256) 2003 EN₁, показало, что на движение этого объекта действуют одновременно несколько апсидально-нодальных и орбитальных резонансов, в результате чего в его движении возникает хаотичность.

Положения, выносимые на защиту

- Результаты исследования орбитальной эволюции метеороидных частиц потока Квадрантиды, выброшенных из астероида (196256) 2003 EH₁, сближающихся с Юпитером и движущихся в окрестности орбитальных резонансов. Хаотичность в движении этих частиц появляется в окрестности границ, разделяющих резонансное и нерезонансное движения, а также при сближении частиц с Юпитером. Устойчивые выброшенные частицы могут быть захвачены в резонанс Лидова-Козая, который защищает их от тесных сближений с Юпитером. Отсутствие тесных сближений с Юпитером приводит к довольно гладкой траектории с почти постоянной большой полуосью.
- Хаотичность орбитального движения астероида 3200 Phaethon возникает из-за сближений с Венерой, которые приводят к переходу астероида через орбитальный резонанс с данной планетой. Нестабильная геометрическая конфигурация резонанса 3/7 с Венерой (неудачная попытка захвата объекта в резонанс), а точнее, переход между резонансными и нерезонансными состояниями, является причиной проявления хаотичности в движении объекта

Содержание

ВВЕДЕНИЕ

1. Математическая модель движения астероидов со сложной структурой возмущений

1.1. Уравнения движения. Математическое моделирование возмущающих сил

1.1.1. Гравитационное влияние планет и отдельных малых тел

1.1.2. Возмущение от несферичности Солнца и Земли

1.1.3. Релятивистские поправки

1.1.4. Возмущения от светового давления

1.2. Определение начальных параметров орбит

1.3. Интегратор Эверхарта

1.4. Построение доверительных областей

1.5. Показатели точности в задаче построения вероятностных областей движения астероидов

1.5.1. Показатели точности

1.5.2. Методы нахождения точек граничных поверхностей доверительных областей

1.5.3. Алгоритмы оценивания точности вероятностной модели движения астероидов

1.6. Алгоритмы введения весовых множителей и отбраковки измерений в задачах улучшения орбит астероидов

1.7. Особенности исследования динамики потенциально опасных астероидах, наблюдавшихся в одной оппозиции

1.8. Численно–аналитическая методика выявления орбитальных и вековых резонансов в движении объекта

1.9. Алгоритм MEGNO-анализа орбитальной эволюции объектов

2. Описание методик исследования структуры возмущений астероидов

2.1. Вводные замечания. Описание методик

2.2. Пример применения методик для оценки влияния сжатия Земли на движение астероидов 2011 MD и 2011 CQ1

2.3. Пример применения методик при оценке влияния сжатия Солнца на движение астероидов 1995 CR и 2011 KE

2.4. Анализ результатов исследования

Содержание

3 Исследование динамики астероида (3200) Phaethon под влиянием наложения различных резонансов

3.1 Вводные замечания. Астероид (3200) Phaethon 1983 ТВ.

3.2 Улучшение орбиты и построение начальной доверительной области

3.3 Исследование вероятностной орбитальной эволюции

3.4 Исследование хаотичной и регулярной динамики под действием наложения различных резонансов

3.5 Заключение по 3 главе

4 Исследование вероятностной эволюции астероида (196256) 2003 EH1

4.1 Вводные замечания. Астероид (196256) 2003 EH1

4.2 Особенности структуры резонансных возмущений и вероятностной орбитальной эволюции астероида (196256) 2003 EH1

4.3 Анализ вероятностной орбитальной эволюции метеорного потока Квадрантиды, освобожденного из астероида (196256) 2003 EH1

4.3.1. Моделирование метеорного потока Квадрантиды

4.3.2. Орбитальные характеристики метеороидов Квадрантид по результатам моделирования

4.3.3. Особенности эволюции модельного потока метеороидов Квадрантид

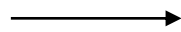
4.4 Заключение по 4 главе

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Задача вероятностного исследования движения малых тел

Наблюдения объекта $\mathbf{d}^*$



Задача наименьших квадратов

$$\Phi(\mathbf{q}) = [\mathbf{d}(\mathbf{q}) - \mathbf{d}^*]^T \mathbf{W}[\mathbf{d}(\mathbf{q}) - \mathbf{d}^*] = \min$$



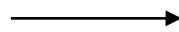
Оценки вектора определяемых параметров $\hat{\mathbf{q}}$ и
его ковариационной матрицы ошибок $\hat{\mathbf{D}}$



Построение начальных доверительных областей

Задача вероятностного исследования движения малых тел

Наблюдения объекта $\mathbf{d}^*$



Задача наименьших квадратов

$$\Phi(\mathbf{q}) = [\mathbf{d}(\mathbf{q}) - \mathbf{d}^*]^T \mathbf{W}[\mathbf{d}(\mathbf{q}) - \mathbf{d}^*] = \min$$



Оценки вектора определяемых параметров $\hat{\mathbf{q}}$ и
его ковариационной матрицы ошибок $\hat{\mathbf{D}}$



Построение начальных доверительных областей



χ^2 ? Черницов и др., 2005; Авдюшев, 2009

Начальная доверительная
область $B_{\mathbf{q}}^0$

Задача вероятностного исследования движения малых тел

Наблюдения объекта $\mathbf{d}^*$



Задача наименьших квадратов
$$\Phi(\mathbf{q}) = [\mathbf{d}(\mathbf{q}) - \mathbf{d}^*]^T \mathbf{W}[\mathbf{d}(\mathbf{q}) - \mathbf{d}^*] = \min$$



Оценки вектора определяемых параметров $\hat{\mathbf{q}}$ и
его ковариационной матрицы ошибок $\hat{\mathbf{D}}$



Построение начальных доверительных областей



χ ? Черницов и др., 2005; Авдюшев, 2009

Начальная доверительная
область $B_{\mathbf{q}}^0$



$\varepsilon_{отн}$?

Оценка возмущающих сил

Задача вероятностного исследования движения малых тел

Наблюдения объекта $\mathbf{d}^*$



Задача наименьших квадратов
 $\Phi(\mathbf{q}) = [\mathbf{d}(\mathbf{q}) - \mathbf{d}^*]^T \mathbf{W}[\mathbf{d}(\mathbf{q}) - \mathbf{d}^*] = \min$



Оценки вектора определяемых параметров $\hat{\mathbf{q}}$ и
его ковариационной матрицы ошибок $\hat{\mathbf{D}}$



Построение начальных доверительных областей



χ ? Черницов и др., 2005; Авдюшев, 2009

Начальная доверительная
область $B_{\mathbf{q}}^0$



$\varepsilon_{отн}$?

Оценка возмущающих сил



Исследование динамики малого тела

Общая постановка задачи построения доверительной области

$$\mathcal{P}\left\{\mathbf{q}_t \in B_{\mathbf{q},\gamma}(\hat{\mathbf{q}} / \mathbf{d}^*)\right\} \geq \gamma \quad (1)$$

В линейной постановке начальную область можно представить в виде доверительного эллипсоида

$$\begin{aligned} (\mathbf{q}_t - \hat{\mathbf{q}})^T [\mathbf{R}^T(\hat{\mathbf{q}}) \mathbf{W} \mathbf{R}(\hat{\mathbf{q}})] (\mathbf{q}_t - \hat{\mathbf{q}}) &= \hat{\varepsilon}, \\ \hat{\varepsilon} &\cong \sigma_0^2 m F^*(m; n - m; \gamma) \end{aligned} \quad (2)$$

Milani, 1999; Ивашкин, Стихно, 2009;

Алгоритм построения доверительных областей

➡ случайные точки заполняют граничную поверхность доверительного эллипсоида

$$\mathbf{q}_j^* = \hat{\mathbf{q}} + \frac{k^*}{|\eta_j|} \mathbf{A} \eta_j^T \quad (3)$$

Сюсина и др., 2012



Оценивание нелинейности

В качестве меры нелинейности в задаче построения доверительных областей нами рассматривался показатель нелинейности (Сюсина и др., 2012; Черницов и др., 2014)

$$\chi = \max \left| 1 - \frac{1}{\bar{l}_i} \right| \quad (4)$$

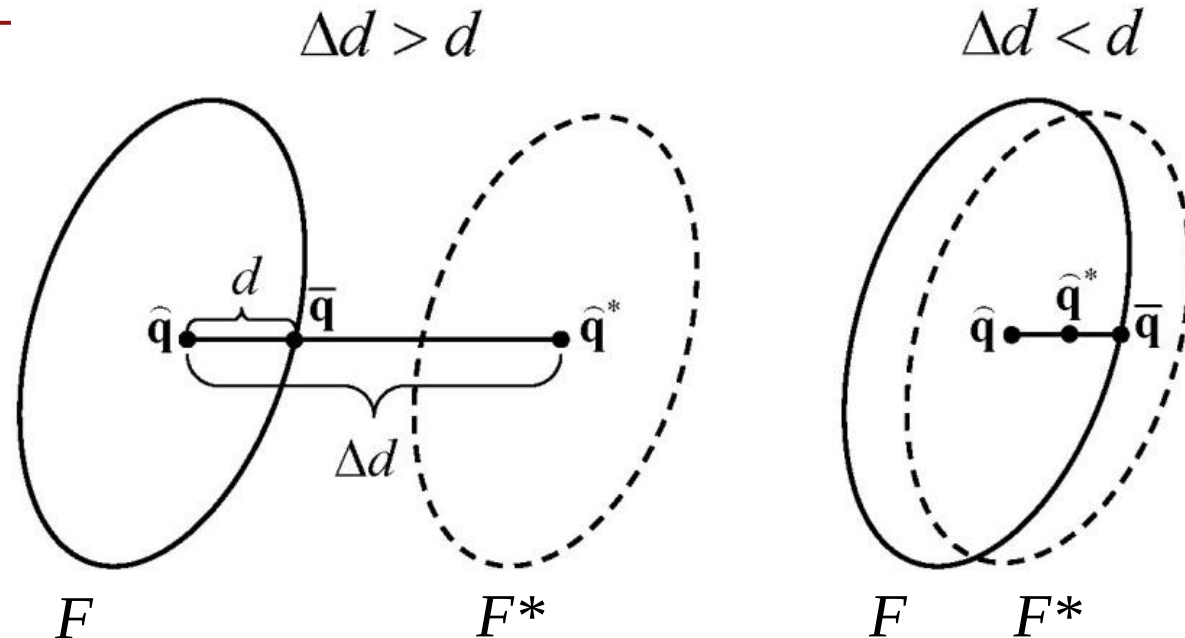
Значения параметра $\bar{l}_i$ определялись из решения нелинейного уравнения $F(\mathbf{q}) = \Phi(\mathbf{q}) - \Phi_F = 0$, где в выражении $\mathbf{q} = \hat{\mathbf{q}} + \bar{l}_i (\mathbf{q}^i - \hat{\mathbf{q}})$, $\mathbf{q}^i$ - это вершины «доверительного» эллипсоида.

Показатели точности построения доверительных областей($\varepsilon_{отн}$)

$$\varepsilon_{отн} = \frac{\Delta d}{d} = \frac{|\hat{\mathbf{q}}^* - \hat{\mathbf{q}}|}{|\bar{\mathbf{q}} - \hat{\mathbf{q}}|}, \quad (5)$$

граница точности

$$\varepsilon_{отн} \in [0.01 \div 0.1]$$



где $\Delta d = |\hat{\mathbf{q}}^* - \hat{\mathbf{q}}|$ – величина смещения НК-оценок $\hat{\mathbf{q}}^*$ и $\hat{\mathbf{q}}$

относительно друг друга для 2-х моделей;

$d = |\bar{\mathbf{q}} - \hat{\mathbf{q}}|$ – расстояние в параметрическом пространстве от НК-оценки $\hat{\mathbf{q}}$ до точки $\bar{\mathbf{q}}$, лежащей на граничной поверхности доверительной области в направлении на НК-оценку $\hat{\mathbf{q}}^*$.

Показатели точности построения доверительных областей

$$\varepsilon_{отн} = \frac{|\hat{\mathbf{q}} - \hat{\mathbf{q}}^*|}{|\bar{\mathbf{q}} - \hat{\mathbf{q}}^*|} = \frac{1}{\bar{l}} \quad (6)$$

$$V_{отн} = \frac{V_i}{V^*} = \frac{\sigma_i}{\sigma_0^*} \left(\frac{|\hat{D}_i|}{|\hat{D}^*|} \right)^{1/2} \quad (7)$$

$\hat{\mathbf{q}}^*$ и $\hat{\mathbf{q}}$ – НК-оценки параметров номинальных орбит астероида, определяемых по данным полных и неполных выборок наблюдений;

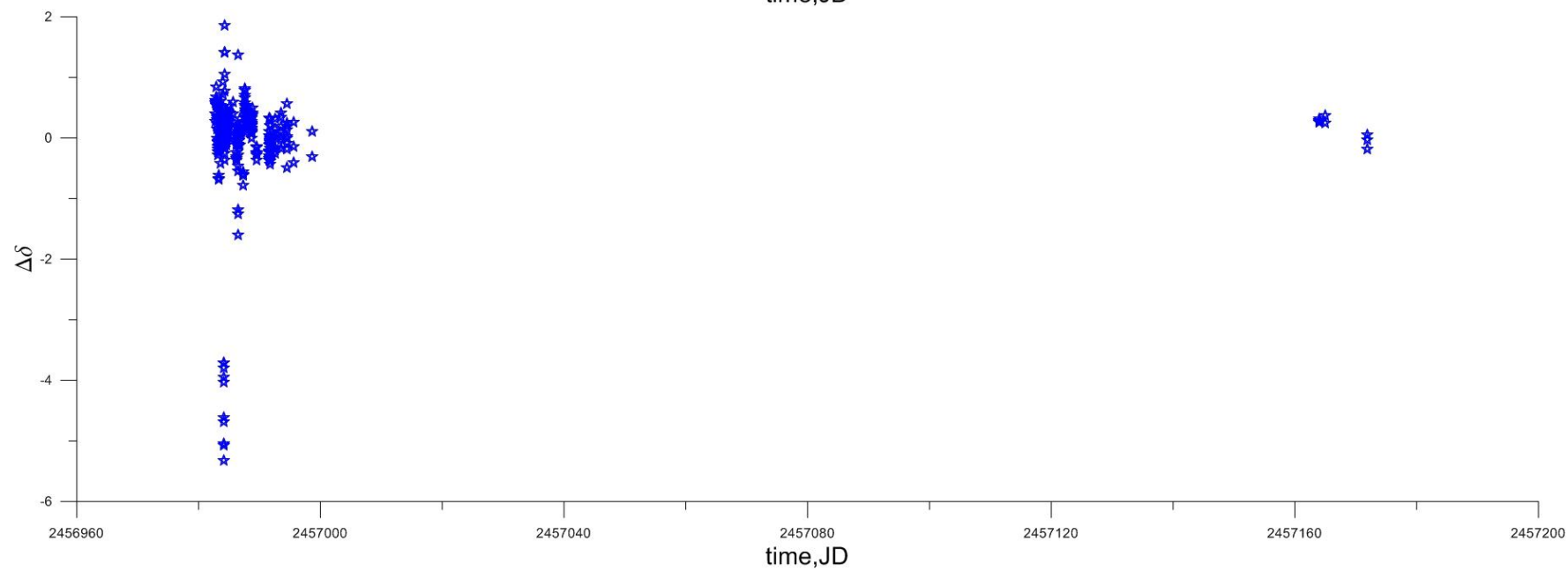
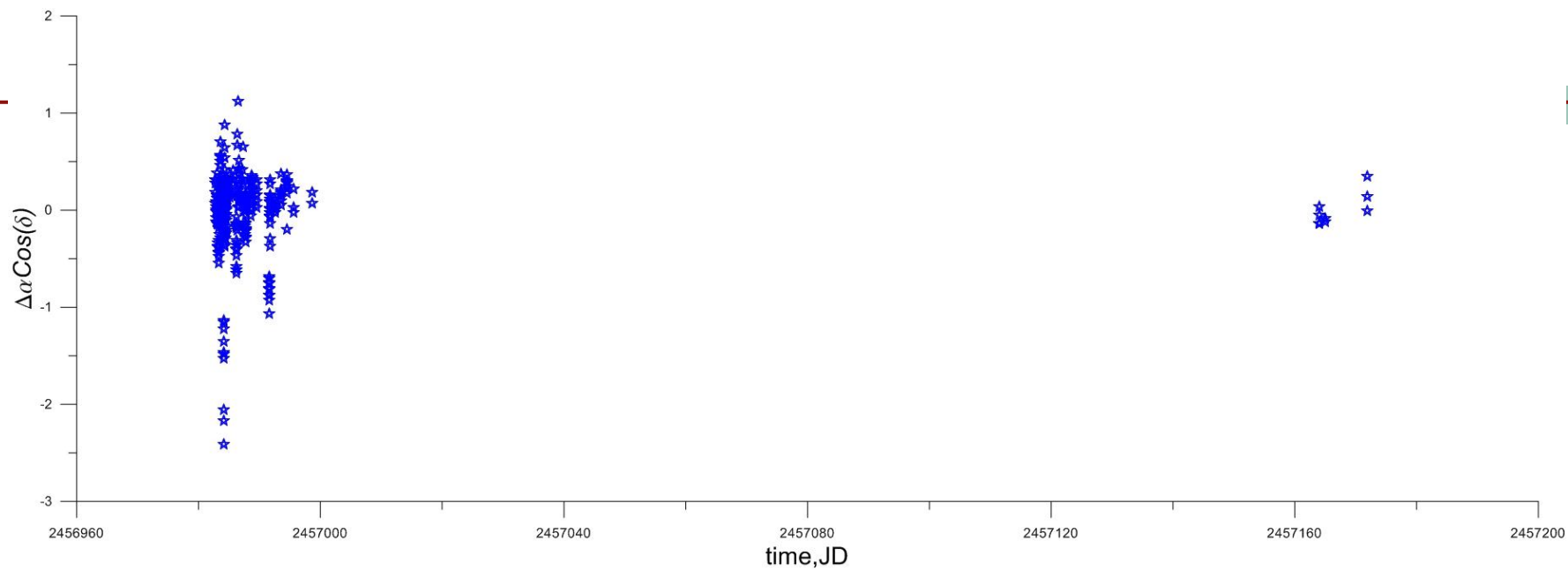
$\bar{l}$ – значение параметра l , которое в зависимости от значения показателя нелинейности χ определяет эту граничную точку в выражении $\mathbf{q}_j^* = \hat{\mathbf{q}} + l_j(\mathbf{q}^j - \hat{\mathbf{q}})$ линейным либо нелинейным методом;

V_i и V^* – объемы доверительных областей, определяемые по полной и неполной i -ой выборке наблюдений;

σ_i и σ_0^* – среднеквадратические ошибки единицы веса, соответственно, по i -ой и полной выборке наблюдений.



Астероид 2014 WZ120

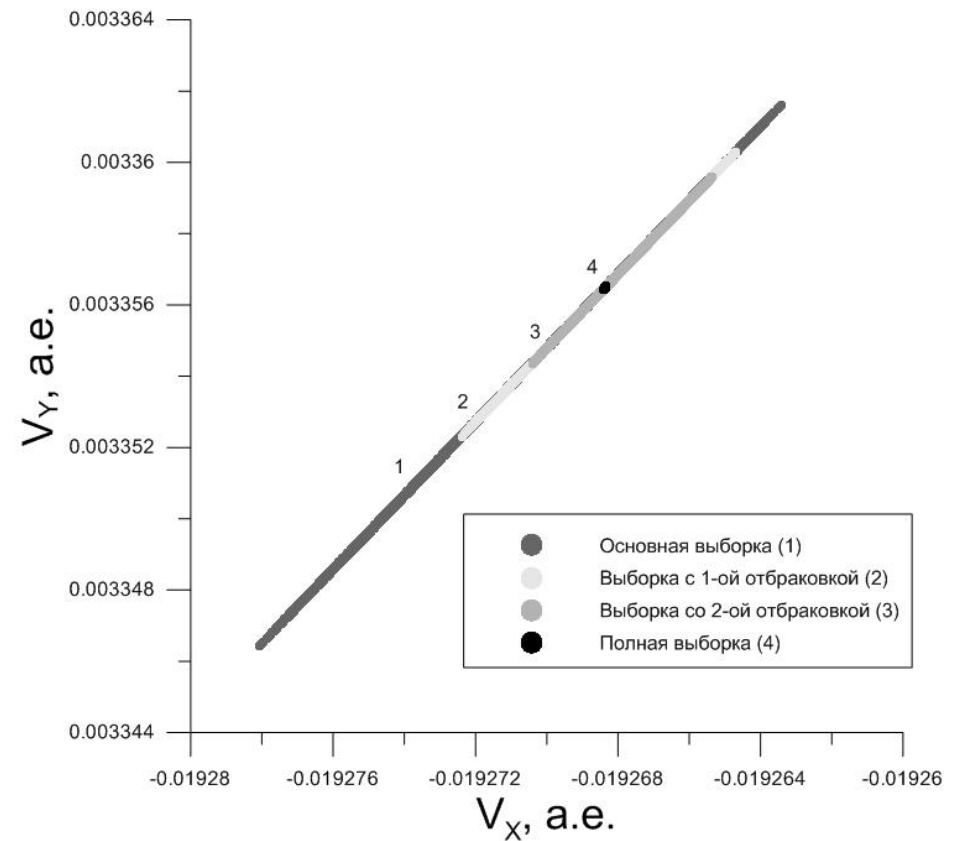
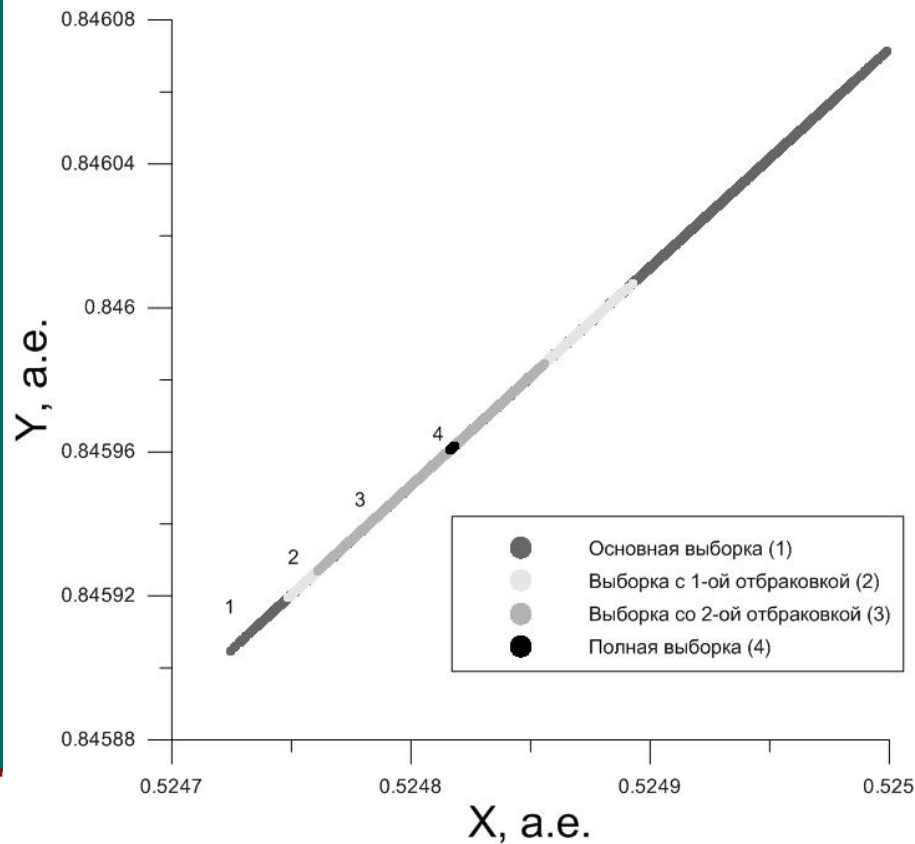


Отбраковка наблюдений

Объект	Выборка наблюдений	N	ΔT , сут.	χ	$V^{отн}$	$\varepsilon^{отн}$	σ_0 , "
2014 WZ120	основная выборка	336	16	0.01732	1	-	0.6699
	выборка с 1-ой отбраковкой	316	16	0.01864	$1,08 \cdot 10^{-2}$	0.1845	0.3455
	выборка со 2-ой отбраковкой	289	16	0.01642	$6,19 \cdot 10^{-4}$	0.2378	0.2232
	полная выборка	347	189	0.00003	-	-	0.6614



Отбраковка наблюдений



Введение весовых множителей

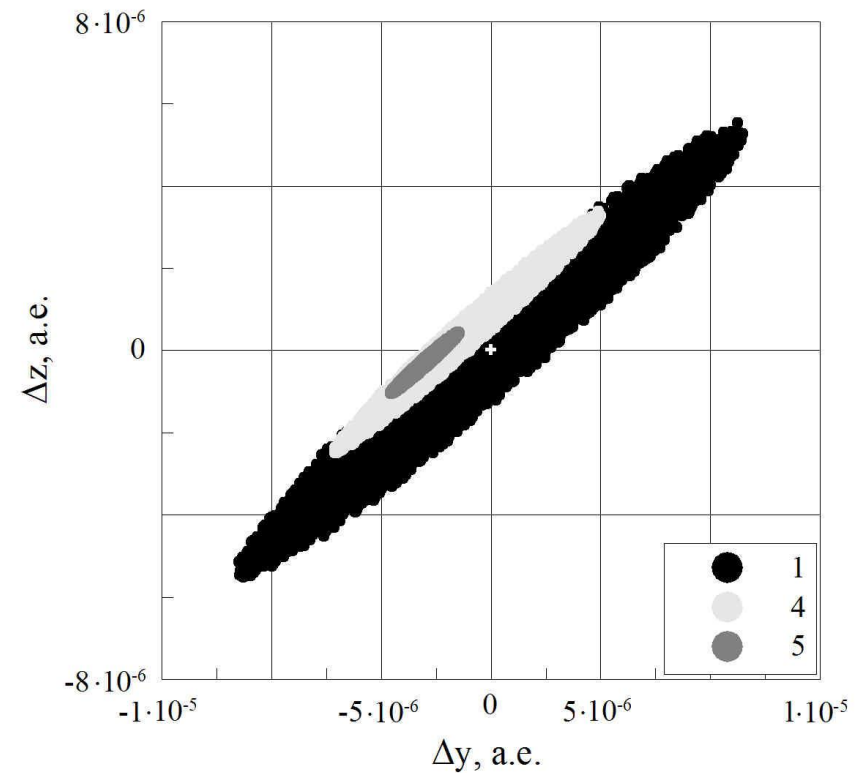
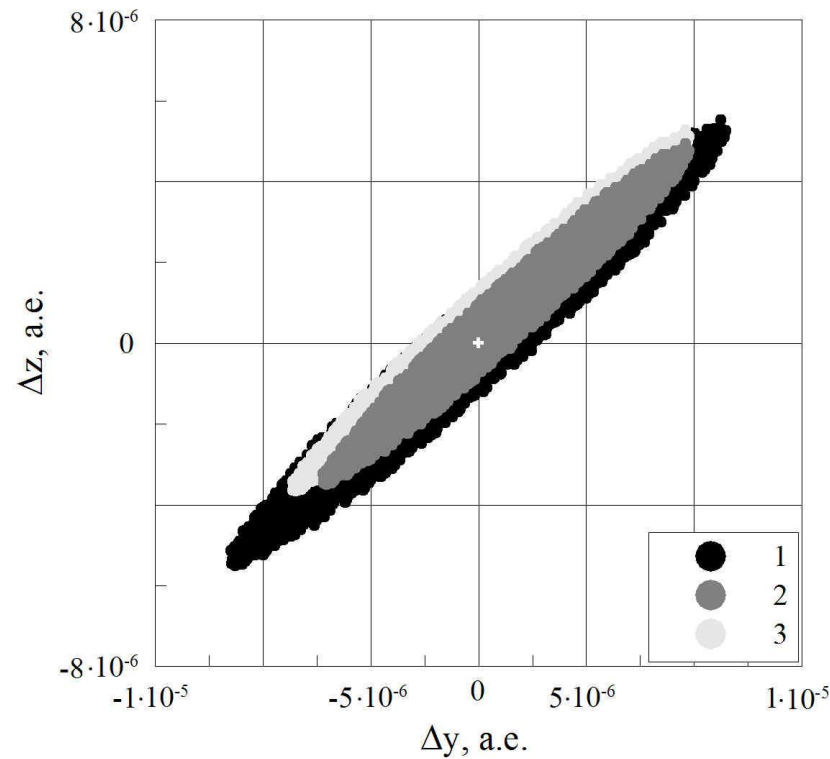
На примере астероида 2010 RX30

p_i	$\varepsilon_{отн}$	$V_i / V_{P=I}$	$\sigma_0, ''$
1	-	-	1.97242
$1 / \sqrt{\Phi_i}$	0.053	0.271	1.49974
$\sqrt{\rho_i}$	0.124	0.0959	0.53645
ρ_i	0.392	0.00785	0.15622
ρ_i^2	1.800	0.000038	0.015520



Введение весовых множителей

На примере астероида 2010 RX30



$$p_{ii} = 1 \quad - 1$$

$$p_{ii} = 1/\sqrt{\Phi_i} \quad - 2$$

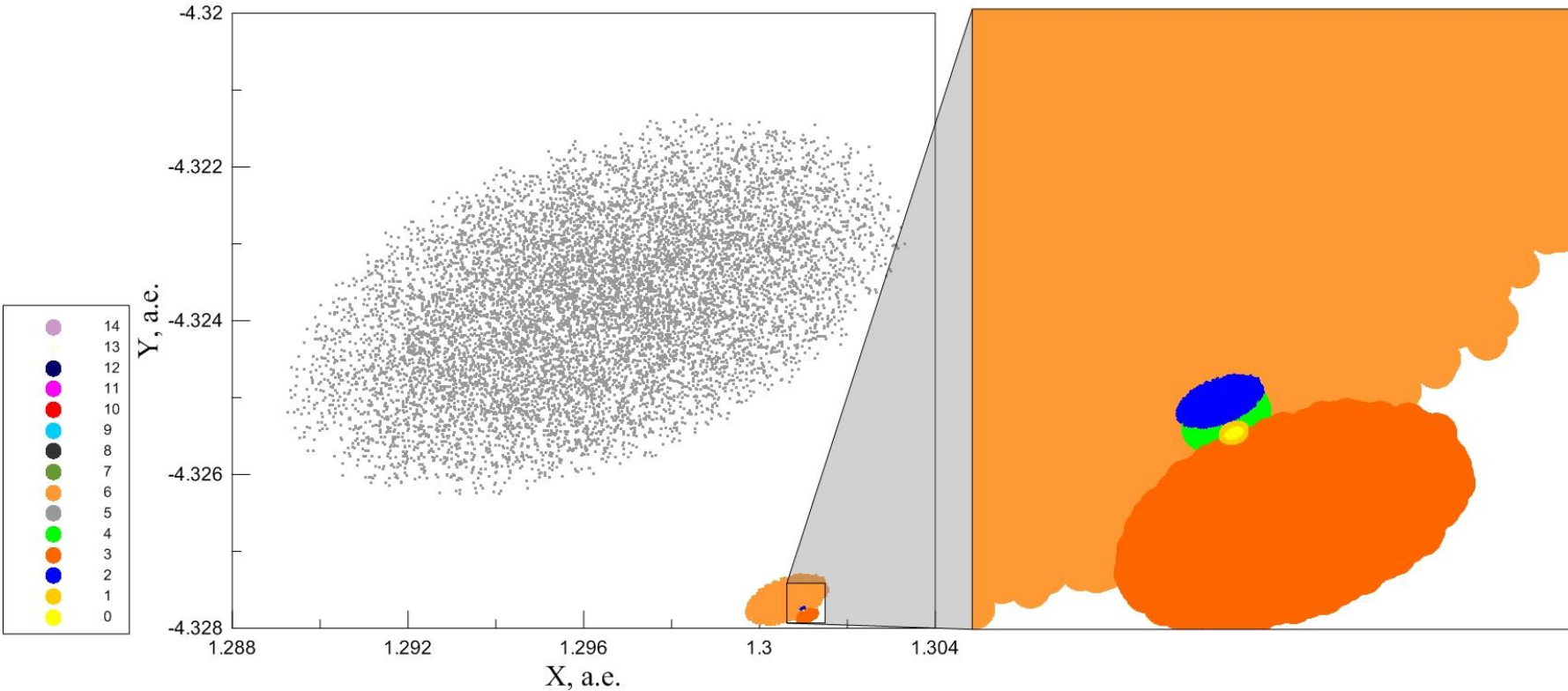
$$p_{ii} = \sqrt{\rho_i} \quad - 3$$

$$p_{ii} = \rho_i \quad - 4$$

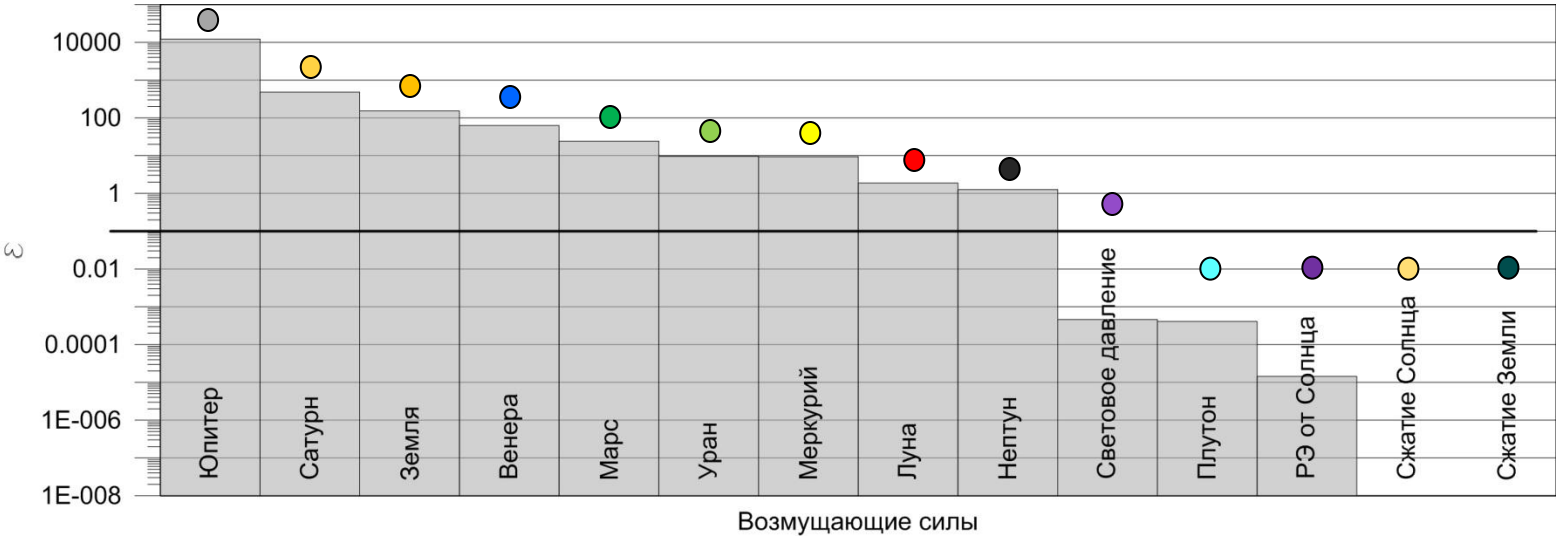
$$p_{ii} = \rho_i^2 \quad - 5$$



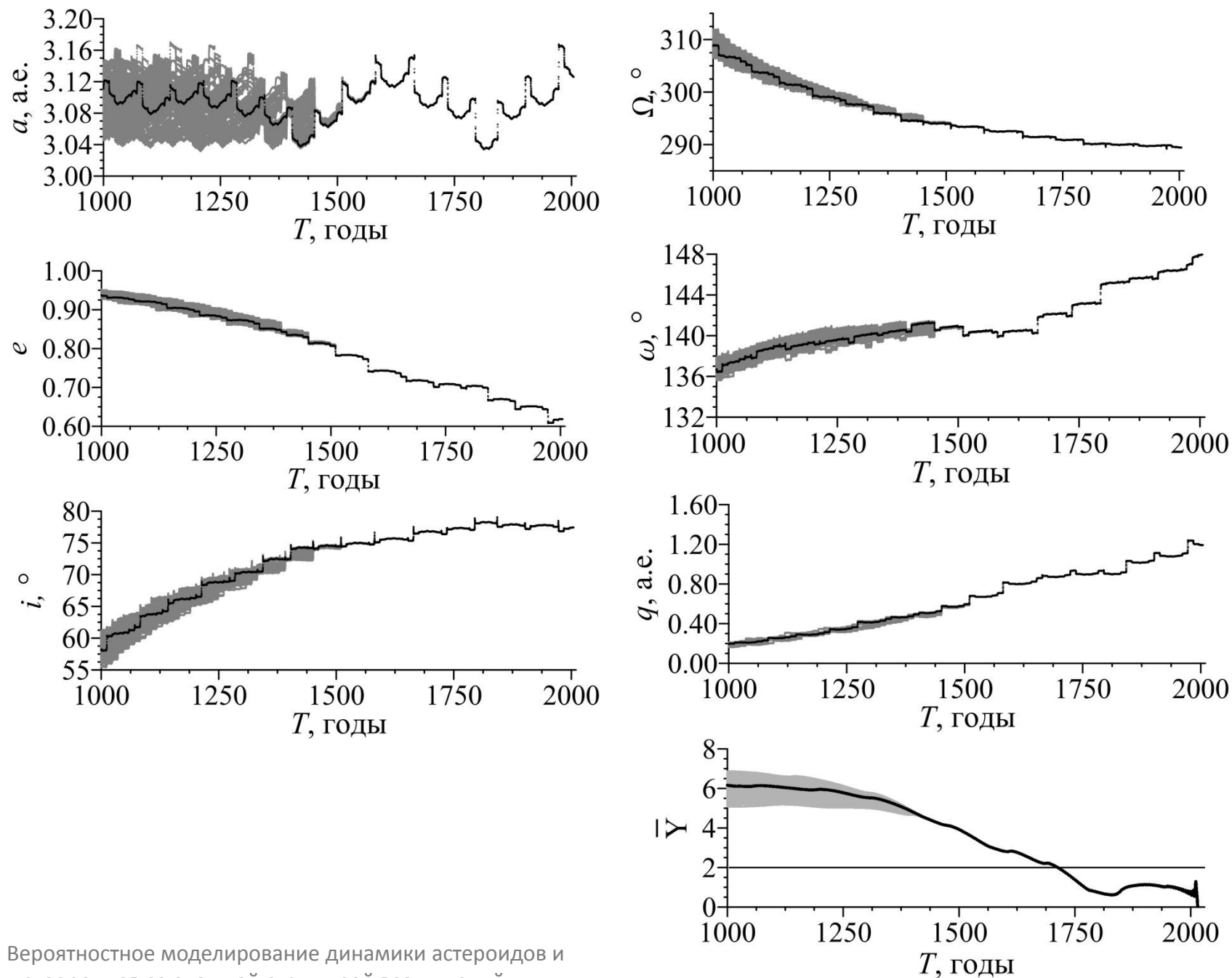
Оценка возмущающих сил на примере начальных доверительных областей для различных моделей движения астероида (196256) 2003ЕН1



модель	$\mathcal{E}_{отн}$
	2003ЕН1
Меркурий	9.4
Венера	63
Земля	152
Марс	24.3
Юпитер	12213
Сатурн	483
Уран	9.59
Нептун	1.27
Плутон	$4.096 \cdot 10^{-4}$
Луна	1.882
РЭ от Солнца	$1.442 \cdot 10^{-5}$
Сжатие Земли	0
Сжатие Солнца	0
Световое давление	$4.63 \cdot 10^{-4}$



Эволюция орбитальных элементов астероида (196256) 2003 EH1



Методика выявления апсидально-нодальных резонансов

- Возмущающая функция:

$$R = \frac{\mu'}{a'} \sum_{l=2}^{\infty} \alpha^l \sum_{m=0}^l (-1)^{l-m} \chi_m \frac{(l-m)!}{(l+m)!} \times \sum_{p, p'=0}^l F_{lmp}(i) F_{lmp'}(i') \times \\ \times \sum_{q, q'=-\infty}^{\infty} X_{l-2p+q}^{l, l-2p}(e) X_{l-2p'+q'}^{-l-1, l-2p'}(e') \times \cos \psi,$$

- Аргумент возмущающей функции для однократно и двукратно осредненной ограниченной задачи трех тел:

$$\underline{\underline{\psi}} = (l-2p')\omega' - (l-2p)\omega - \bar{m}(\Omega - \Omega').$$

- Условия возникновения резонанса:

$$\underline{\underline{\dot{\psi}}} \approx 0.$$



Нумерация апсидально-нодальных резонансных соотношений

№	Типы резонансных соотношений	№	Типы резонансных соотношений	№	Типы резонансных соотношений
1	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) + \dot{\omega} - \dot{\omega}'_i$	8	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) - 2\dot{\omega} - 2\dot{\omega}'_i$	15	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) - 2\dot{\omega}'_i$
2	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) - \dot{\omega} + \dot{\omega}'_i$	9	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) + 2\dot{\omega}$	16	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) + 2\dot{\omega}'_i$
3	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) + 2\dot{\omega} - 2\dot{\omega}'_i$	10	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) - 2\dot{\omega}$	17	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i)$
4	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) - 2\dot{\omega} + 2\dot{\omega}'_i$	11	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) + \dot{\omega}$	18	$\dot{\omega} - \dot{\omega}'_i$
5	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) + \dot{\omega} + \dot{\omega}'_i$	12	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) - \dot{\omega}$	19	$\dot{\omega} + \dot{\omega}'_i$
6	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) - \dot{\omega} - \dot{\omega}'_i$	13	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) + \dot{\omega}'_i$	20	$\dot{\omega}$
7	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) + 2\dot{\omega} + 2\dot{\omega}'_i$	14	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) - \dot{\omega}'_i$		



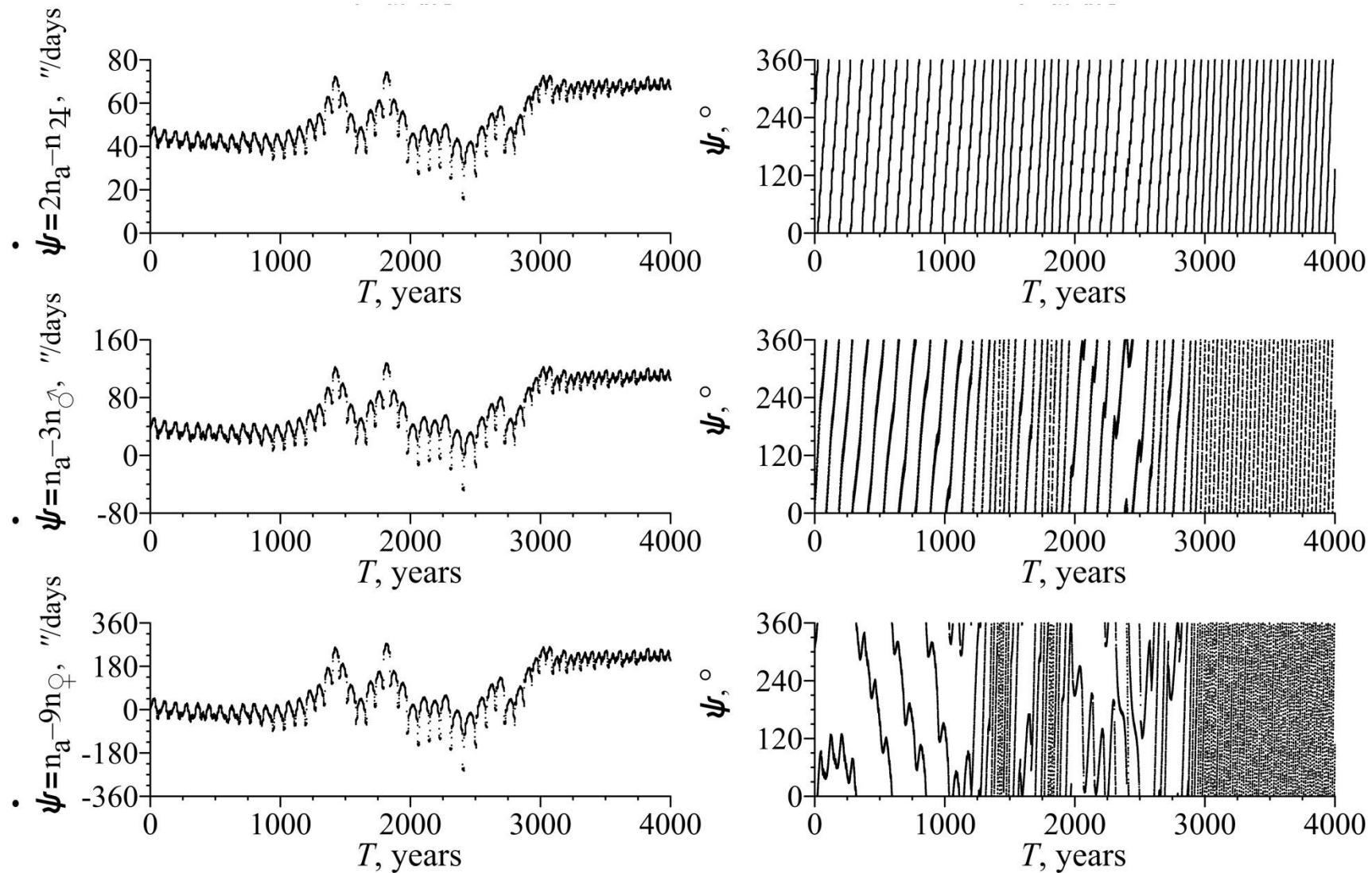
Нумерация апсидально-нодальных резонансных соотношений

№	Типы резонансных соотношений	№	Типы резонансных соотношений	№	Типы резонансных соотношений
1	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) + \dot{\omega} - \dot{\omega}'_i$	8	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) - 2\dot{\omega} - 2\dot{\omega}'_i$	15	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) - 2\dot{\omega}'_i$
2	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) - \dot{\omega} + \dot{\omega}'_i$	9	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) + 2\dot{\omega}$	16	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) + 2\dot{\omega}'_i$
3	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) + 2\dot{\omega} - 2\dot{\omega}'_i$	10	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) - 2\dot{\omega}$	17	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i)$
4	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) - 2\dot{\omega} + 2\dot{\omega}'_i$	11	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) + \dot{\omega}$	18	$\dot{\omega} - \dot{\omega}'_i$
5	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) + \dot{\omega} + \dot{\omega}'_i$	12	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) - \dot{\omega}$	19	$\dot{\omega} + \dot{\omega}'_i$
6	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) - \dot{\omega} - \dot{\omega}'_i$	13	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) + \dot{\omega}'_i$	20	$\dot{\omega}$
7	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) + 2\dot{\omega} + 2\dot{\omega}'_i$	14	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) - \dot{\omega}'_i$		

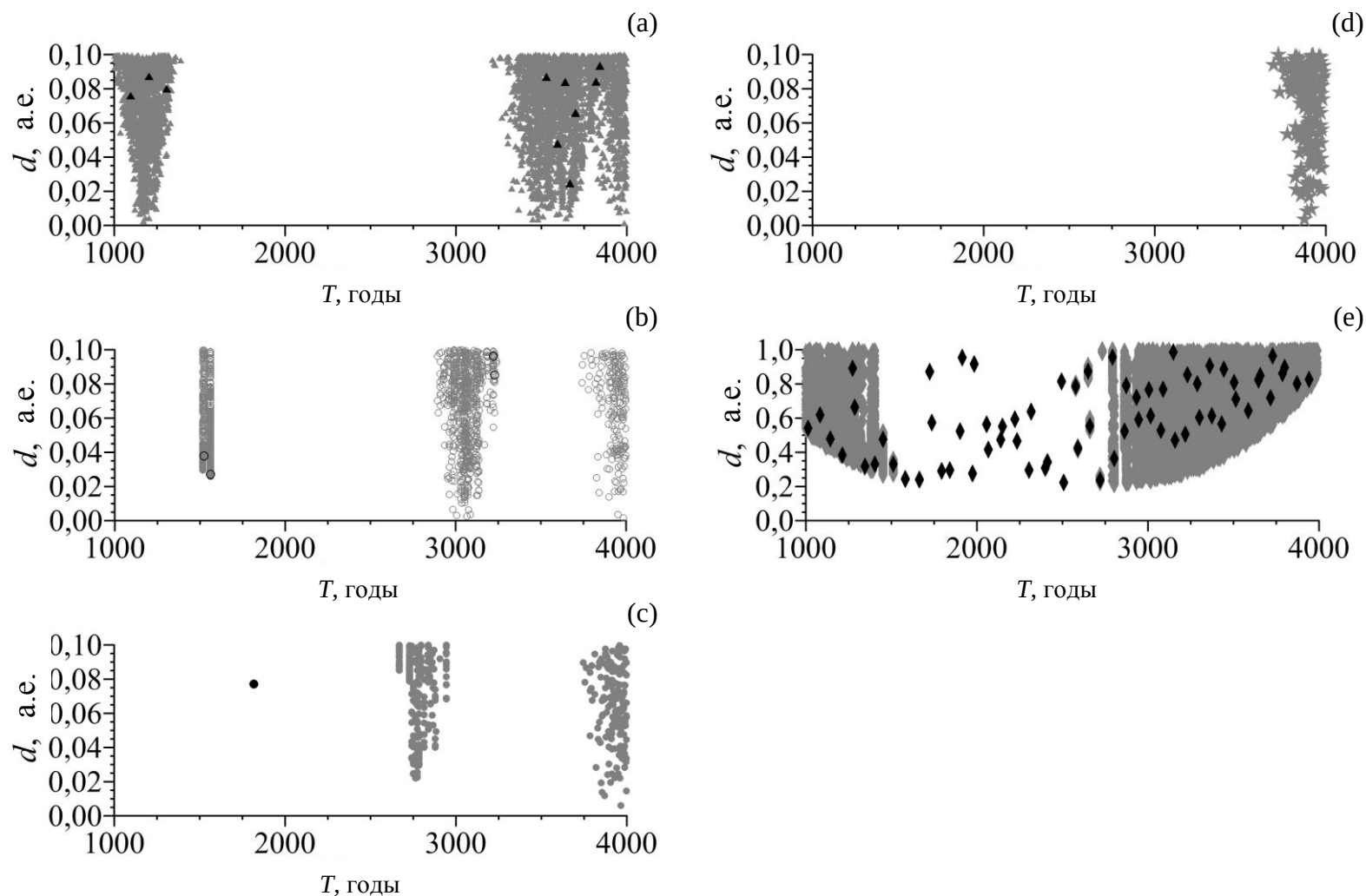
присутствуют на небольших интервалах



Орбитальные резонансы исследуемого объекта



Сближения астероида (196256) 2003 EH1 с планетами



Сближения с Меркурием (a), Венерой (b), Землей (c), Марсом (d) и Юпитером (e).



Причины хаотичного движения

1. Резонансные аргументы имеют колебательные движения (в некоторых случаях с предельной амплитудой) в рассматриваемый промежуток времени для всех 20 вековых резонансов.

Резонансные соотношения осциллируют вблизи нуля с несущественными амплитудами. Поведение похоже для всех планет.

2. Астероид находится в окрестностях орбитальных резонансов, но не захвачен в них. Все орбитальные резонансы неустойчивы и могут быть причиной хаотического движения.

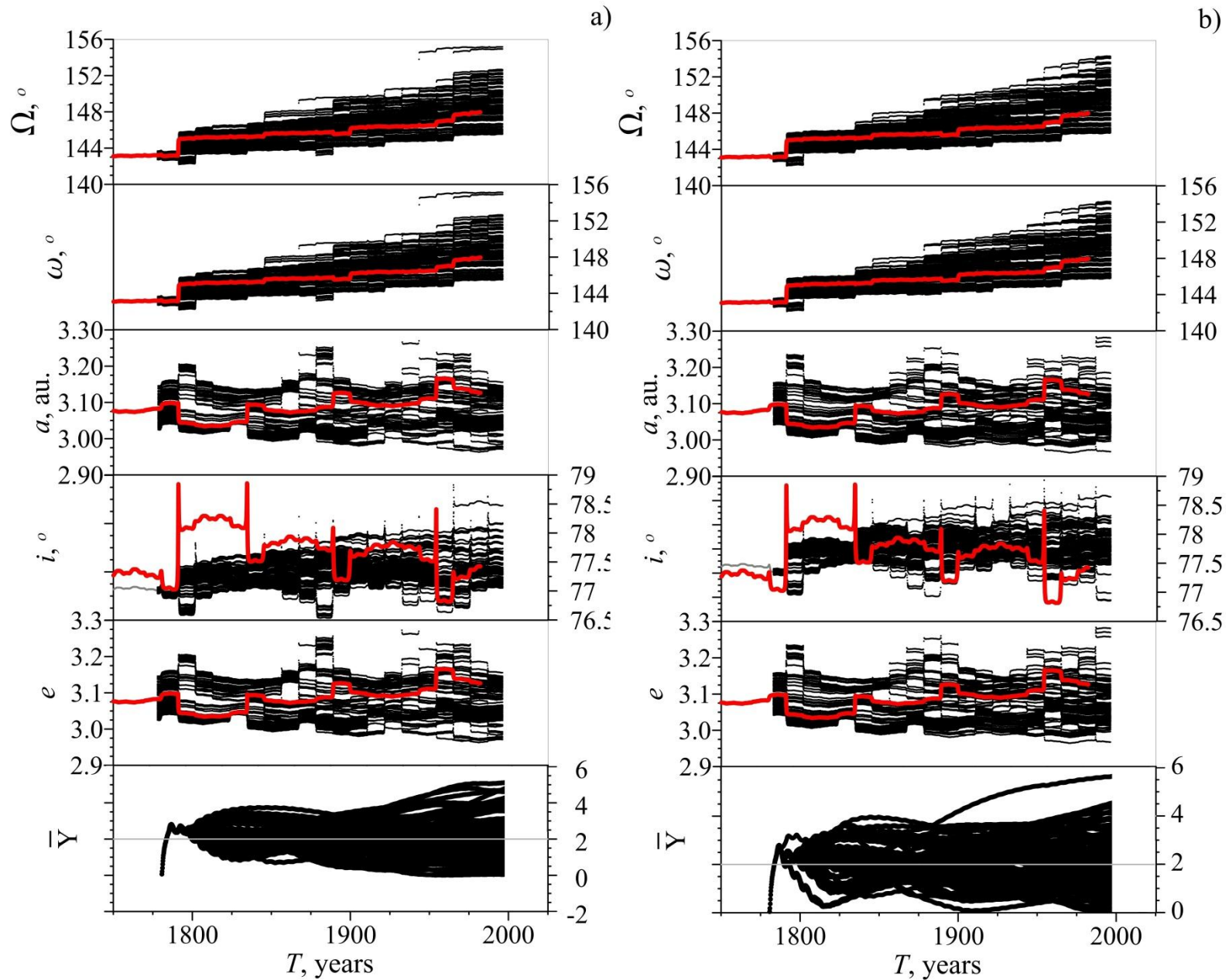
3. Хаотичность в движении этих частиц появляется в окрестности границ, разделяющих резонансное и нерезонансное движения, а также при сближении частиц с Юпитером.

Моделирование метеорного потока

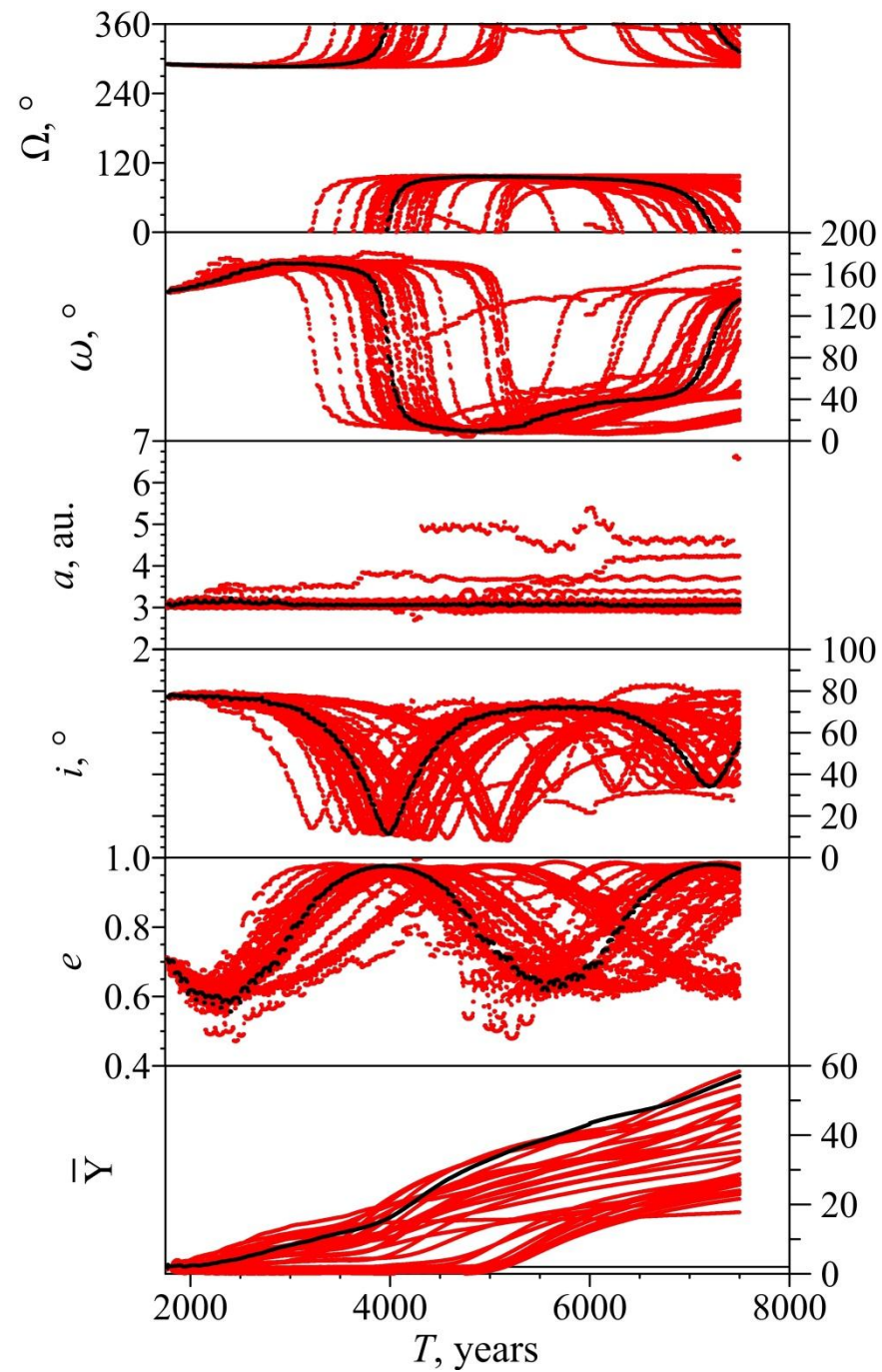
В этом эксперименте ограничились следующими моментами:

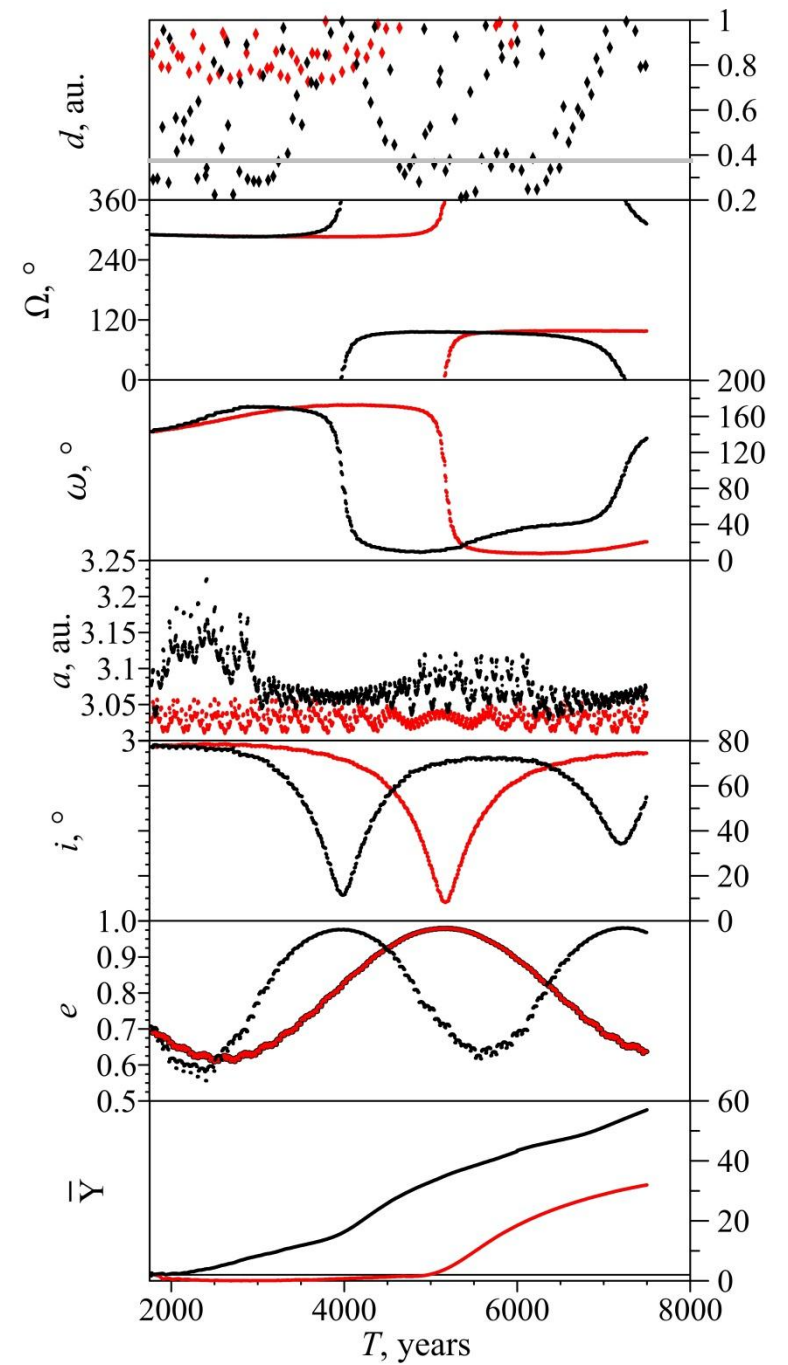
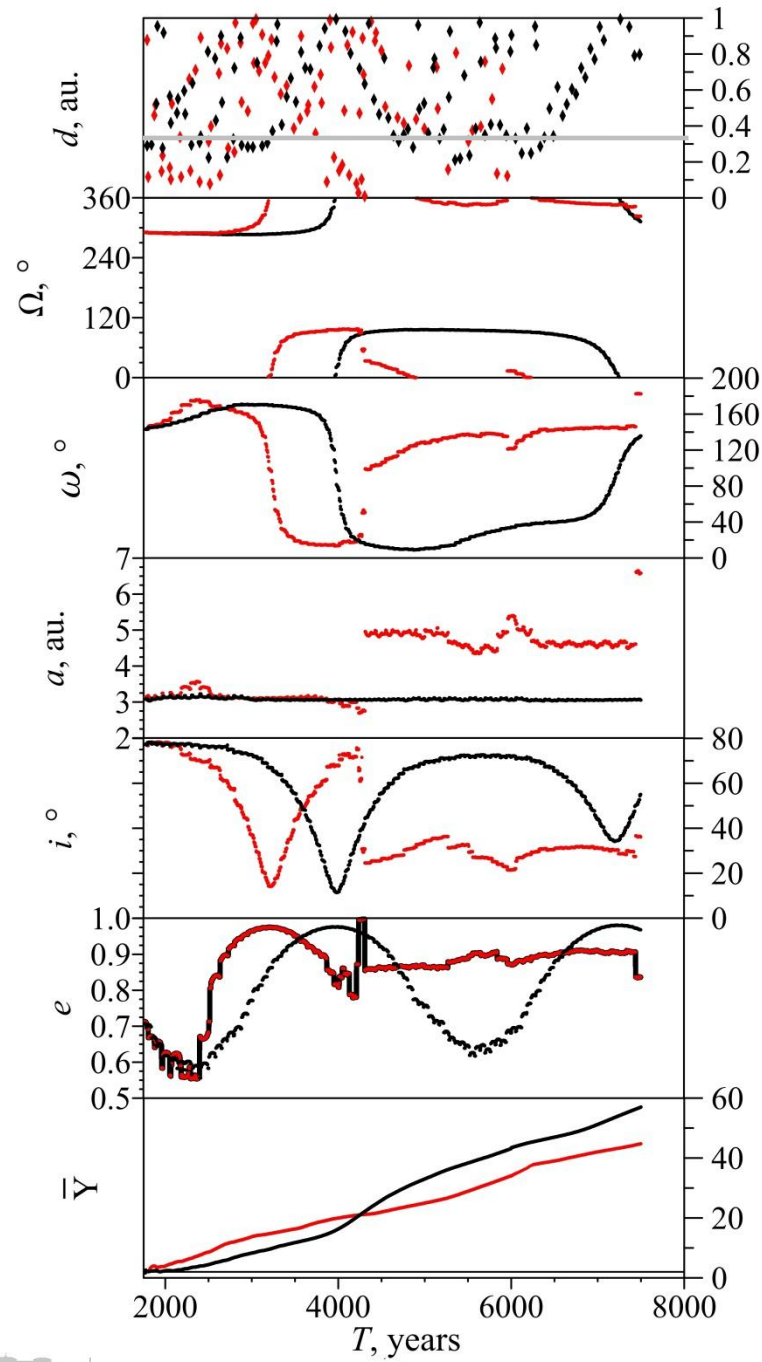
1. Момент первого появления в небе (около 1835 г. н.э.) (Quetelet, 1839; Fisher, 1930).
2. Опираемся на предположениях, что астероид (196256) 2003 EH1 является «ядром» потока (Abedin et. al., 2015; Kholshchevnikov et al. 2016).
3. Номинальная орбита астероида (196256) 2003 EH1 и орбиты доверительного эллипсоида могут считаться регулярными на интервале времени 1760-2020 гг.
4. Результаты многих авторов (Williams et al., 2004b; Wiegert & Brown, 2005; Micheli et al., 2008, Sambarov et.al., 2018) исключили предлагаемую идентификацию комет C/1490 Y1 (Ki-Won , 2009) и C/1385 U1 (Ho, 1962) как исторические кометные явления астероида (196256) 2003 EH1. Это исключает, что метеорный поток мог быть результатом двух больших распадов комет около 1400 и 1500 гг.

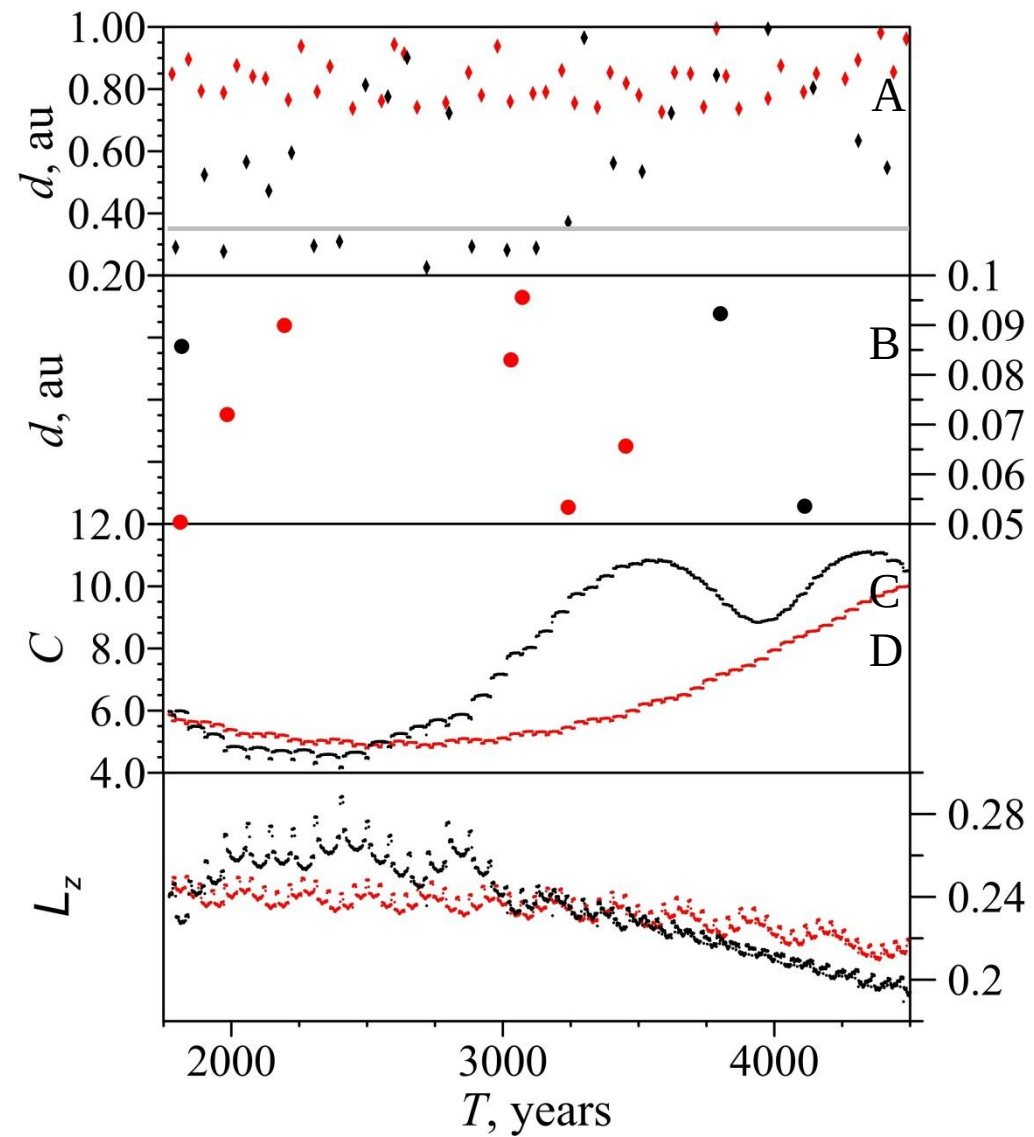
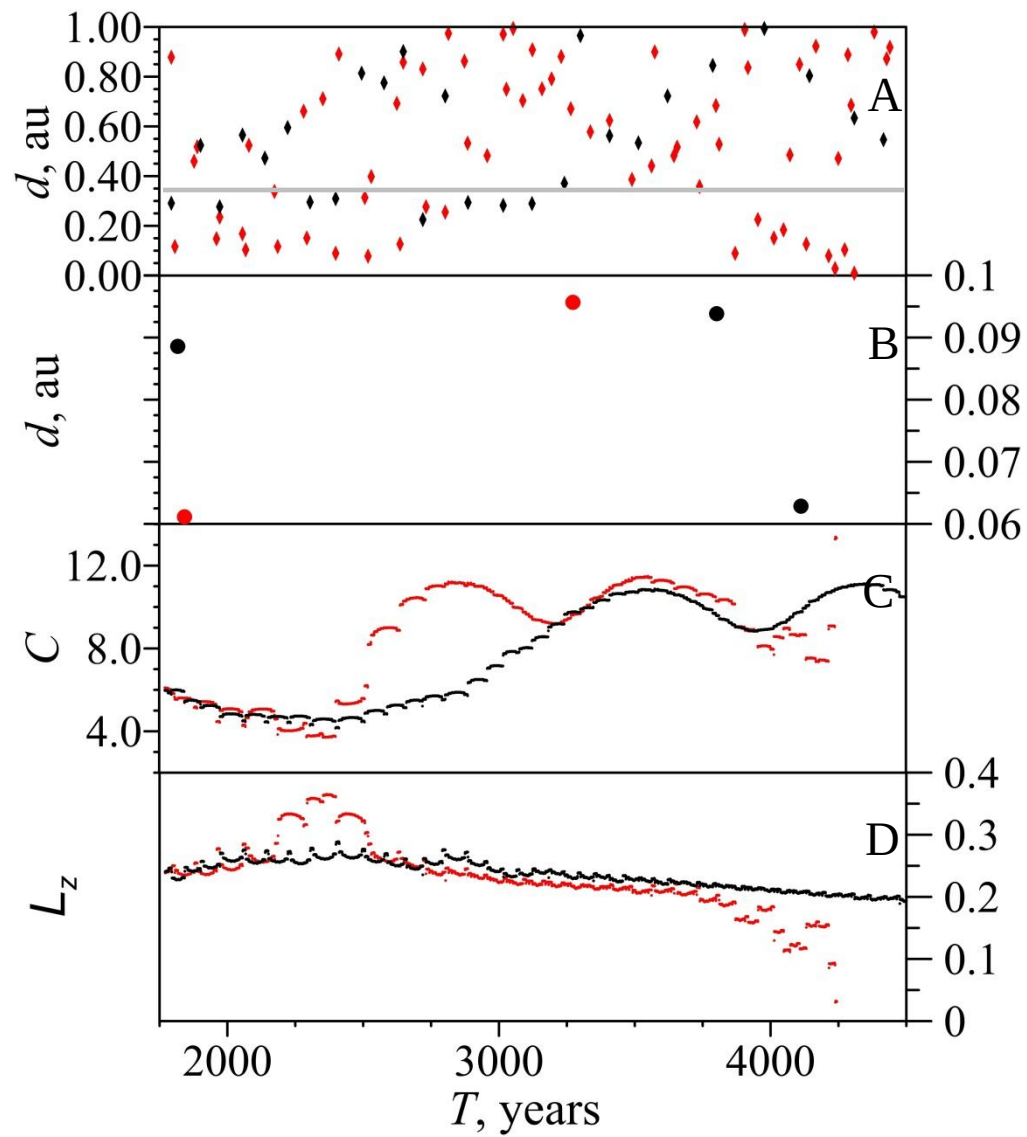
Эволюция орбитальных элементов



Эволюция орбитальных элементов





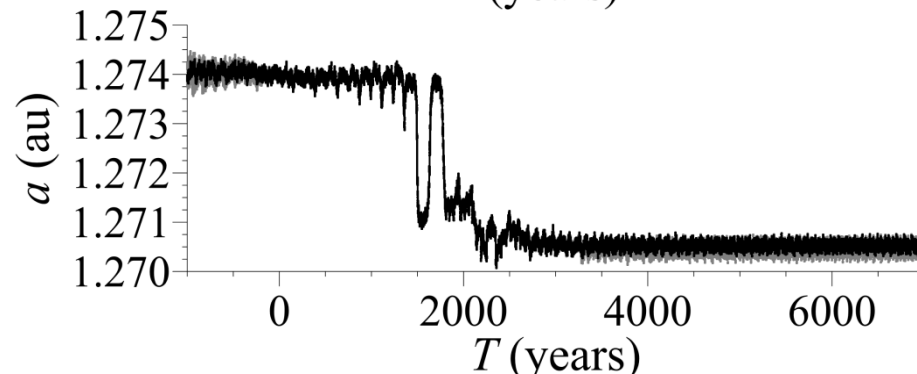
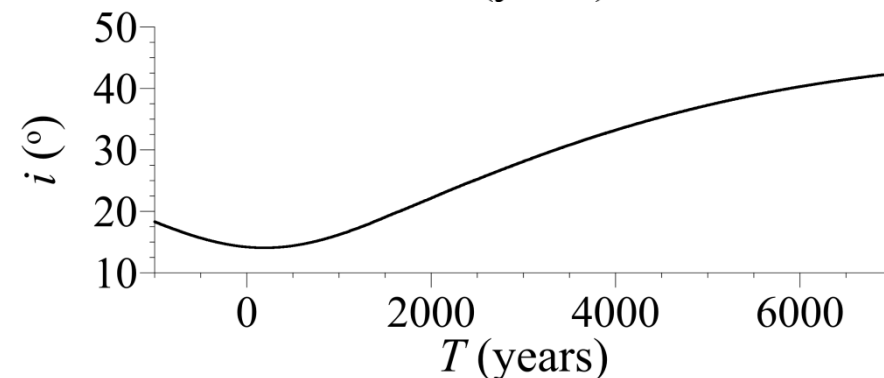
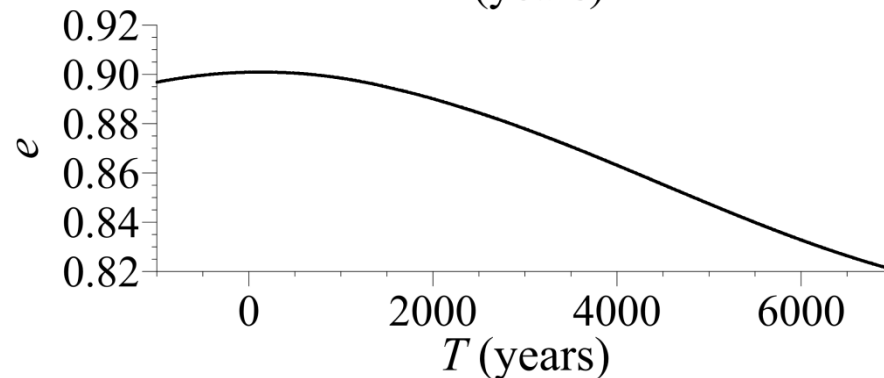
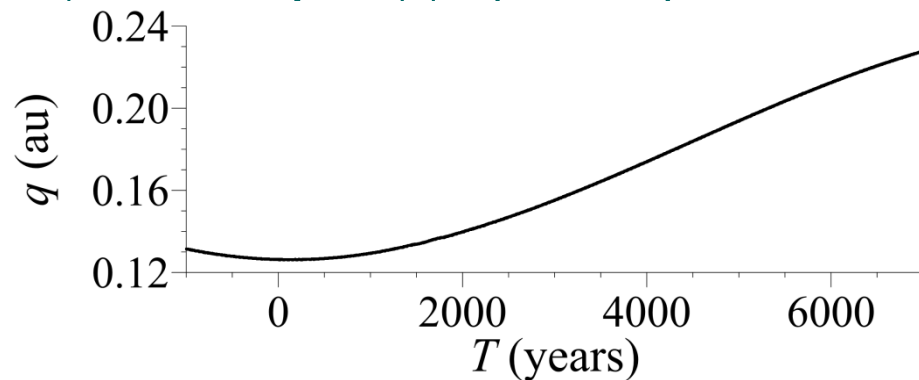
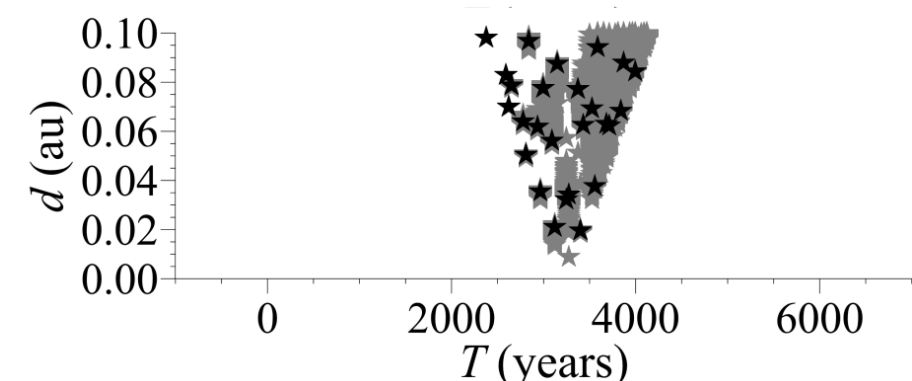
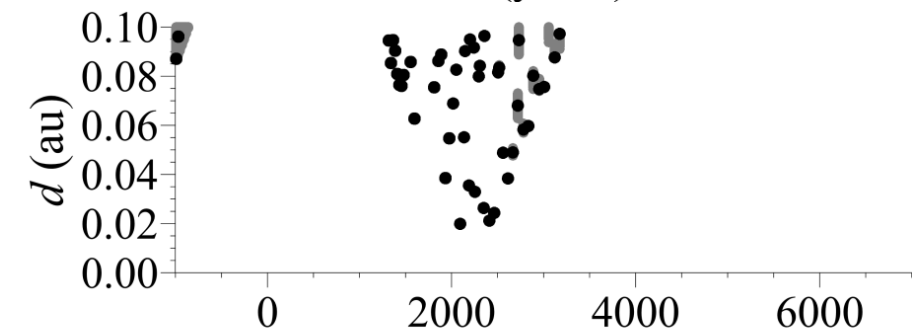
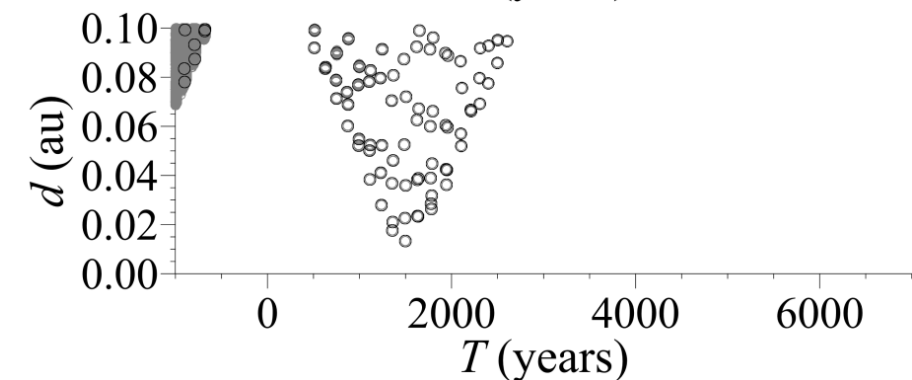
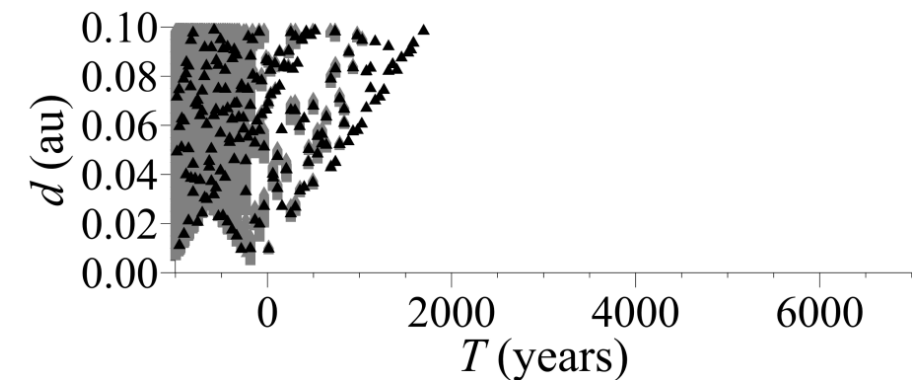


Причины хаотичного движения

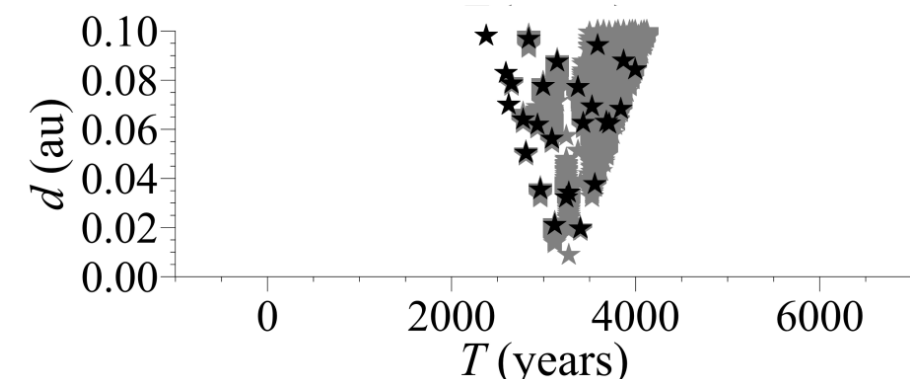
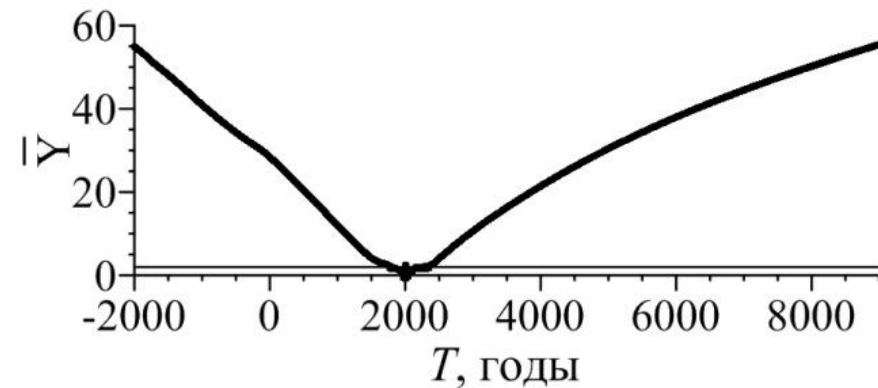
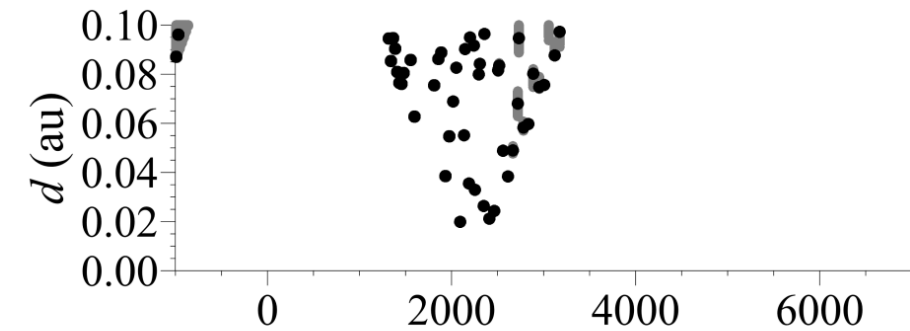
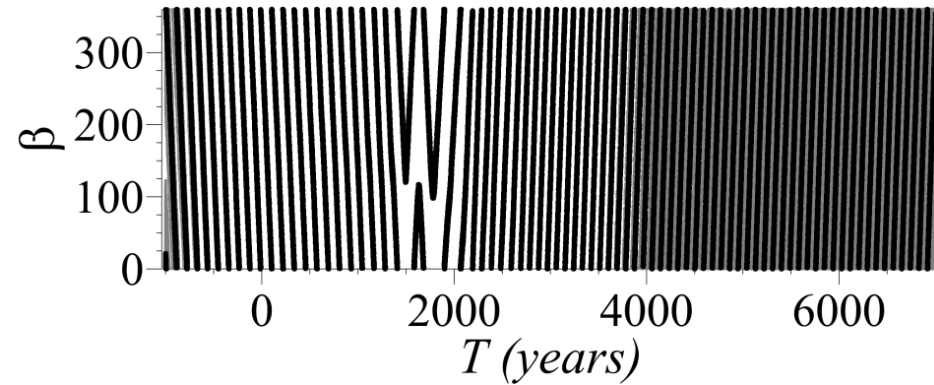
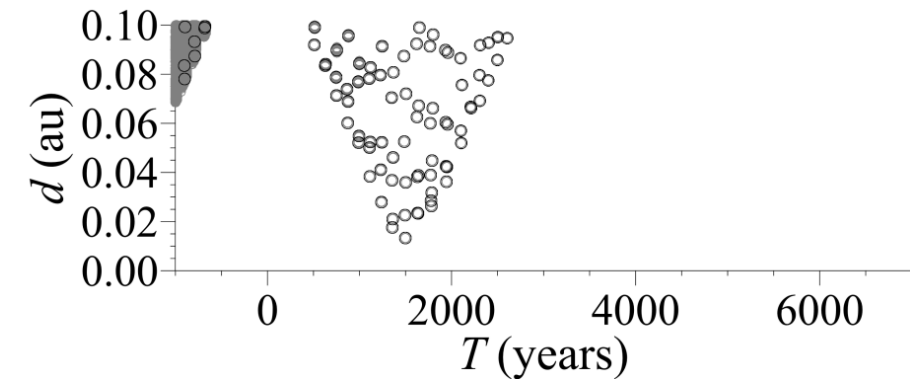
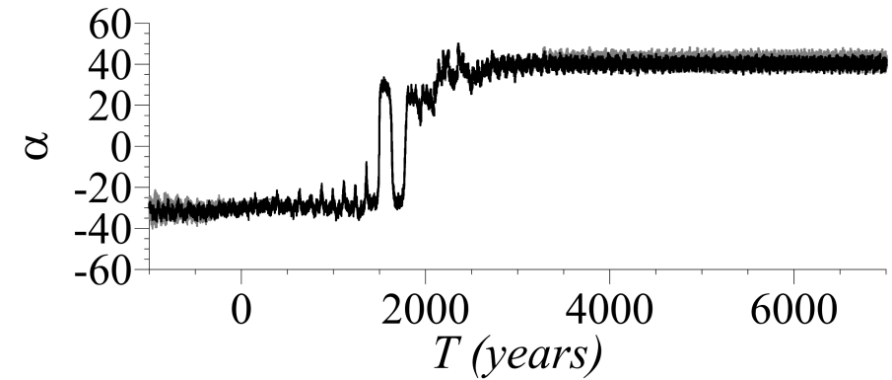
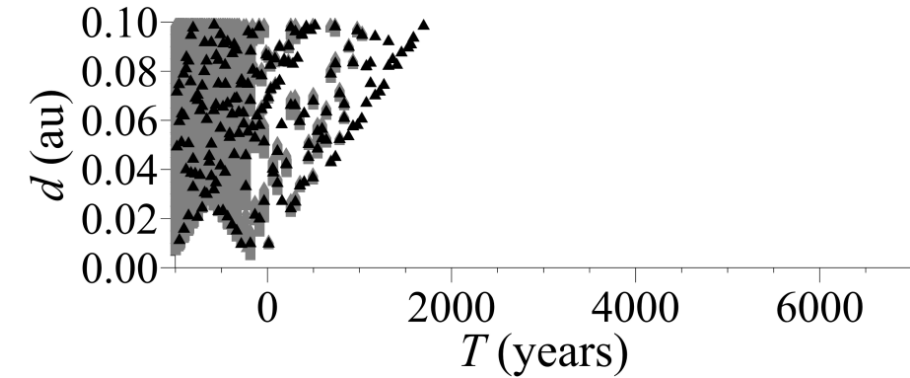
1. Моделируемые метеороиды наследуют динамические свойства астероида (196256) 2003 EH₁, но не все эти свойства.
2. В среднем чуть менее половины выброшенных частиц имеют хаотическое движение, и причиной этого являются частые близкие сближения выброшенных частиц с Юпитером, и они находятся вблизи орбитального резонанса 2:1J с Юпитером.
3. В рамках механизма Лидова-Козаи многие выброшенные частицы будут защищены от тесных сближений с Юпитером. Устойчивые выброшенные частицы захвачены в резонанс Лидова-Козая, который защищает их от тесных сближений с Юпитером.

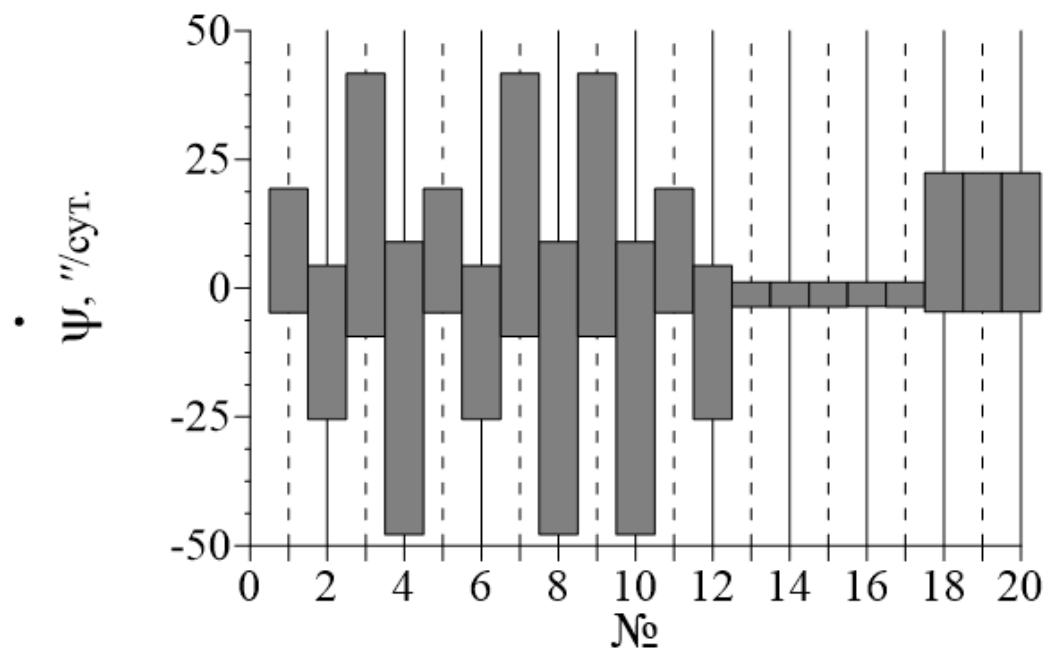
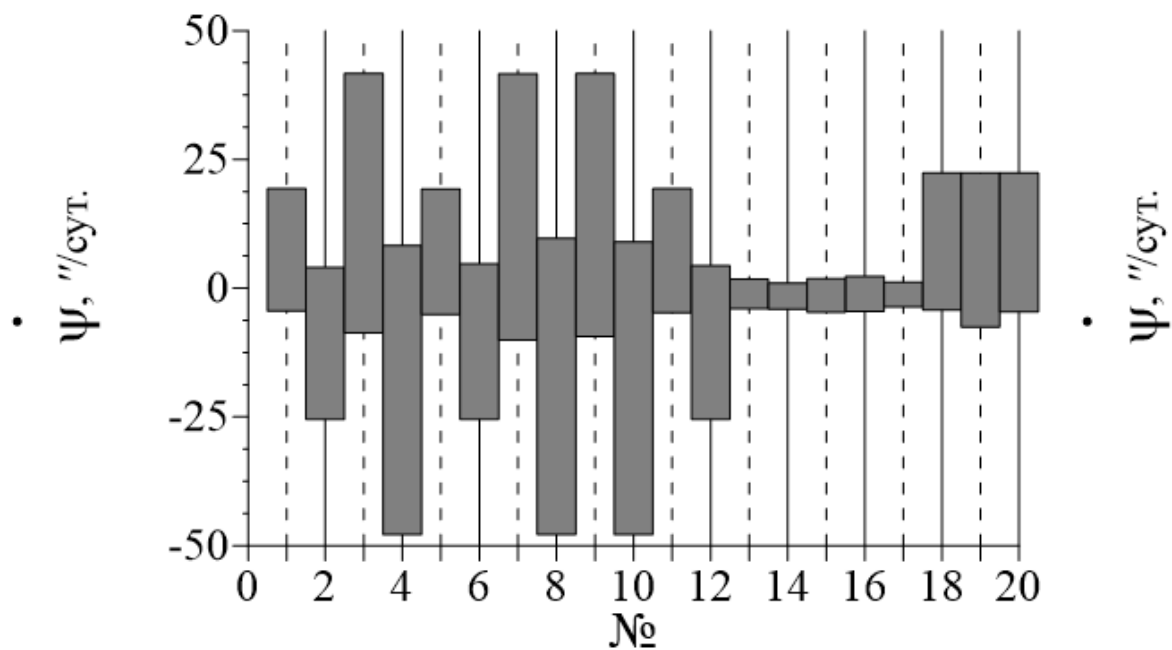


Вероятностная орбитальная эволюция астероида (3200) Phaethon



Вероятностная орбитальная эволюция астероида (3200) Phaethon





Границы изменения резонансных соотношений для апсидально-нодальных резонансов с Землей (а) и остальными планетами (б) на интервале времени $(-2000, 9000)$ гг.

Причины хаотичного движения

1. Нестабильная геометрическая конфигурация резонанса $3/7$ с Венерой (неудачная попытка захвата объекта в резонанс), а точнее околорезонансное состояние, может быть причиной столь резкого проявления хаотичности в движении объекта.

2. Все резонансные соотношения колеблются около нуля, но с разной амплитудой. Таким образом, все резонансы являются устойчивыми и не могут быть причиной хаотичности, каковой, судя по результатам, являются сближения с Землей и Марсом и неустойчивый резонанс $3/7$ с Венерой.

Заключение

1. Для объектов, содержащих малые систематические ошибки в модели движения и наблюдениях, исследованы варианты отбраковки наблюдений и введения весовых множителей, основанные на определении показателя эффективности и сравнения отношений объемов доверительных областей, полученных для разных выборок наблюдений.

2. Выбор весовых множителей задаваемых в виде квадрата расстояний между объектом и Землей каждому наблюдению, для АСЗ является лучшим и приводит уменьшению размеров доверительных областей.

3. Для оценки влияния различных возмущающих факторов на вероятностную динамику астероидов со сложной структурой предложен способ оценивания точности построения доверительных областей. Рассматриваемый способ имеет геометрически ясный, простой вид, и позволяет в ряде случаев определить степень влияния отдельных малых возмущающих сил.

4. Оценено влияние слабых возмущающих факторов для астероидов 1995 CR, 2011 KE (сжатие Солнца); 2011 MD, 2011 CQ1 (сжатие Земли); для всех астероидов оценено влияние релятивистских эффектов от Солнца.



Заключение

5. Усовершенствована численно-аналитическая методика выявления влияния вековых резонансов на орбитальную эволюцию малых тел Солнечной системы и проведено исследование их влияния на астероид (196256) 2003 EH1.

- Влияние вековых резонансов существенно меняет характер движения объектов.
- Существует зависимость возрастания эксцентриситета орбиты малого тела от величины наклона и значений долгот восходящего узла и перицентра.

6. Исследована динамика астероида (196256) 2003 EH1, движущегося в окрестности орбитального резонанса $1/2$ с Юпитером, а так же, под влиянием вековых резонансов. Проведен MEGNO-анализ номинальной и орбит доверительной области астероида (196256) 2003 EH1, и показано, что в окрестности орбитальных резонансов проявляется хаотичность. Так же она связана с наложением вековых и нестабильными орбитальными резонансами.



Заключение

7. Результаты исследования орбитальной эволюции метеороидных частиц потока Квадрантиды, выброшенных из астероида (196256) 2003 EH1, сближающихся с Юпитером и движущихся в окрестности орбитальных резонансов.

8. Хаотичность в движении этих частиц появляется в окрестности границ, разделяющих резонансное и нерезонансное движения, а также при сближении частиц с Юпитером. Устойчивые выброшенные частицы захвачены в резонанс Лидова-Козая, который защищает их от тесных сближений с Юпитером. Отсутствие тесных сближений с Юпитером приводит к довольно гладкой траектории с почти постоянной большой полуосью.

9. Хаотичность орбитального движения астероида 3200 Phaethon возникает из-за сближений с Венерой, которые приводят к переходу астероида через орбитальный резонанс с данной планетой. Нестабильная геометрическая конфигурация резонанса 3/7 с Венерой (неудачная попытка захвата объекта в резонанс), а точнее, переход между резонансными и нерезонансными состояниями, является причиной проявления хаотичности в движении объекта



Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

В теоретическом плане возможно расширение групп вековых резонансов, а также более детальное изучение особенностей влияния каждой группы вековых резонансов на орбитальную эволюцию объектов.

В практическом плане возможно использование полученных результатов для исследования движения метеороидов, астероидов и комет, а так же сопоставление динамических портретов, для понимания эволюции малых тел Солнечной системы.



Апробация работы

По результатам исследований опубликовано 23 работах, из них 9 в изданиях, рекомендуемых ВАК для публикации научных работ.

1. Сюсина О.М., Самбаров Г.Е., Черницов А.М., Тамаров В.А. Исследование влияния ошибок модели движения астероидов на точность построения начальной доверительной области. // Изв. вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. - № 10/2. – С.50–59.
2. Сюсина О.М., Черницов А.М., Тамаров В.А., Самбаров Г.Е. Способ оценки влияния модели сил на систематическую ошибку определения областей возможных движений астероидов // Изв. вузов. Физика. – 2013.– Т. 56. – № 6/3. – С.235–237.
3. Самбаров Г.Е., Сюсина О.М. Оценивание влияния ошибок модели движения астероидов, сближающихся с землей, на точность построения доверительных областей // Вестник СибГАУ. 2014. №4(56) , С. 111–118
4. Самбаров Г.Е., Черницов А.М., Тамаров В.А. Оценивание влияния сжатия Земли и Солнца на точность вероятностной модели движения астероидов, наблюдавшихся в одной оппозиции // Изв. вузов. Физика. – 2014.– Т. 57. – № 10/2. – С. 33–42.
5. Сюсина О.М., Самбаров Г.Е. Новые данные о потенциально опасных астероидах, наблюдавшихся в одной оппозиции // Изв. вузов. Физика. – 2015. – Т. 58. – № 10/2. – С. 40–46.
6. Galushina, T. Yu.; Sambarov, G. E. The dynamical evolution and the force model for asteroid (196256) 2003 EH1 // Planetary and Space Science, 2017, Volume 142, P. 38-47.
7. Sambarov G.E., Syusina O.M., Analysis of Probabilistic Orbital Evolution of the Asteroids 2011 CQ1 and 2011 MD // Russian Physics Journal. 2018. V. 61-2. P. 373
8. Галушина Т.Ю., Самбаров Г.Е. Исследование динамики астероида 3200 Phaethon под влиянием наложения различных резонансов // Астрономический вестник. 2019. Т. 53. № 3. С. 231-239.
9. Sambarov G.E., Galushina, T.Yu., Syusina O.M., Analysis of the dynamical evolution of the Quadrantid meteoroid stream // Planetary and Space Science, 2020, Volume 185, 104885.

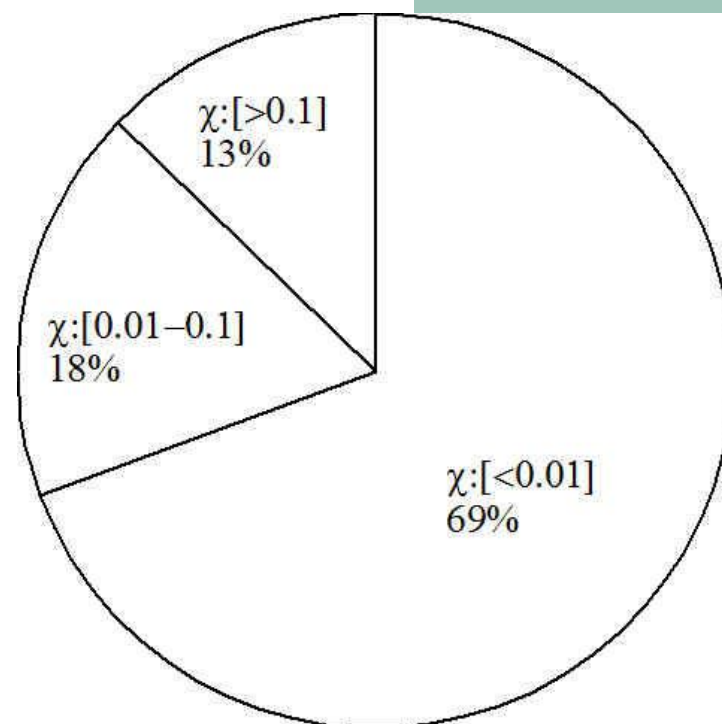
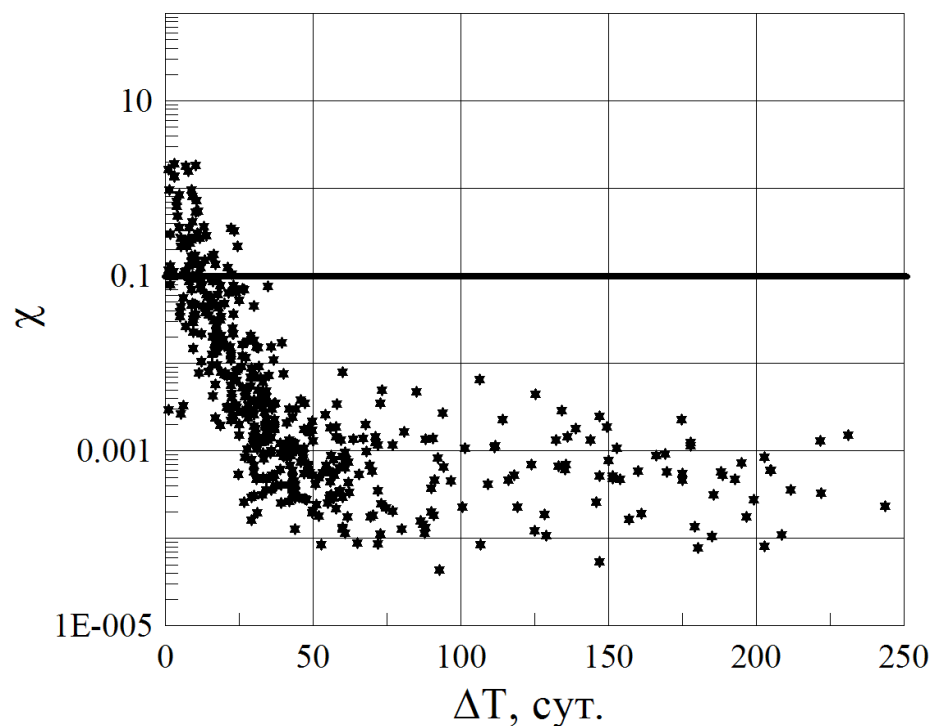


Спасибо за внимание!



Вероятностное моделирование динамики астероидов и
метеороидов со сложной структурой возмущений
Самбаров Г.Е.

Изменения данных МРС



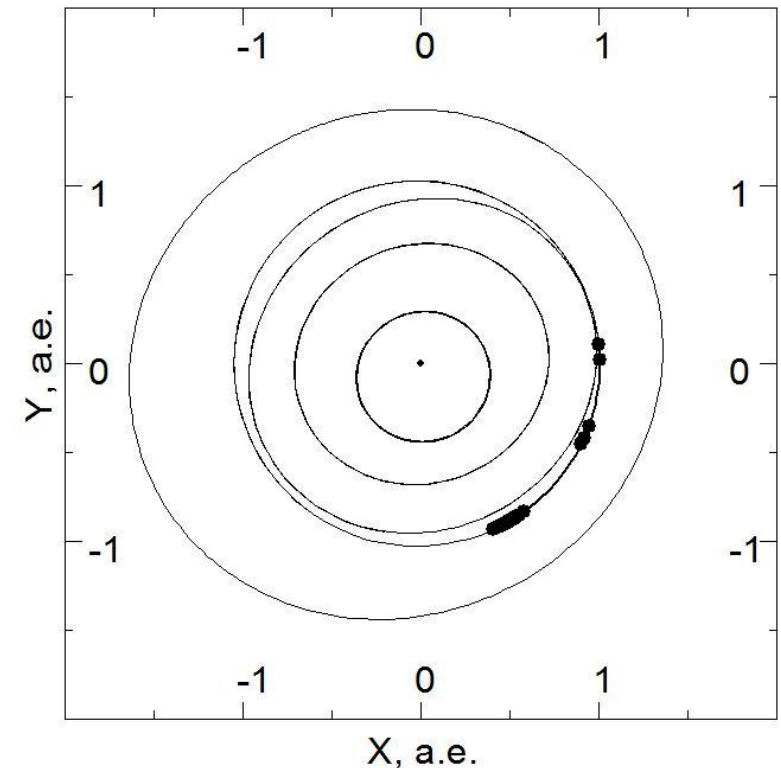
Значения и диаграмма распределения показателей нелинейности χ для 470 РНА, наблюдавшихся в одной оппозиции (данные на август 2015).

Объект

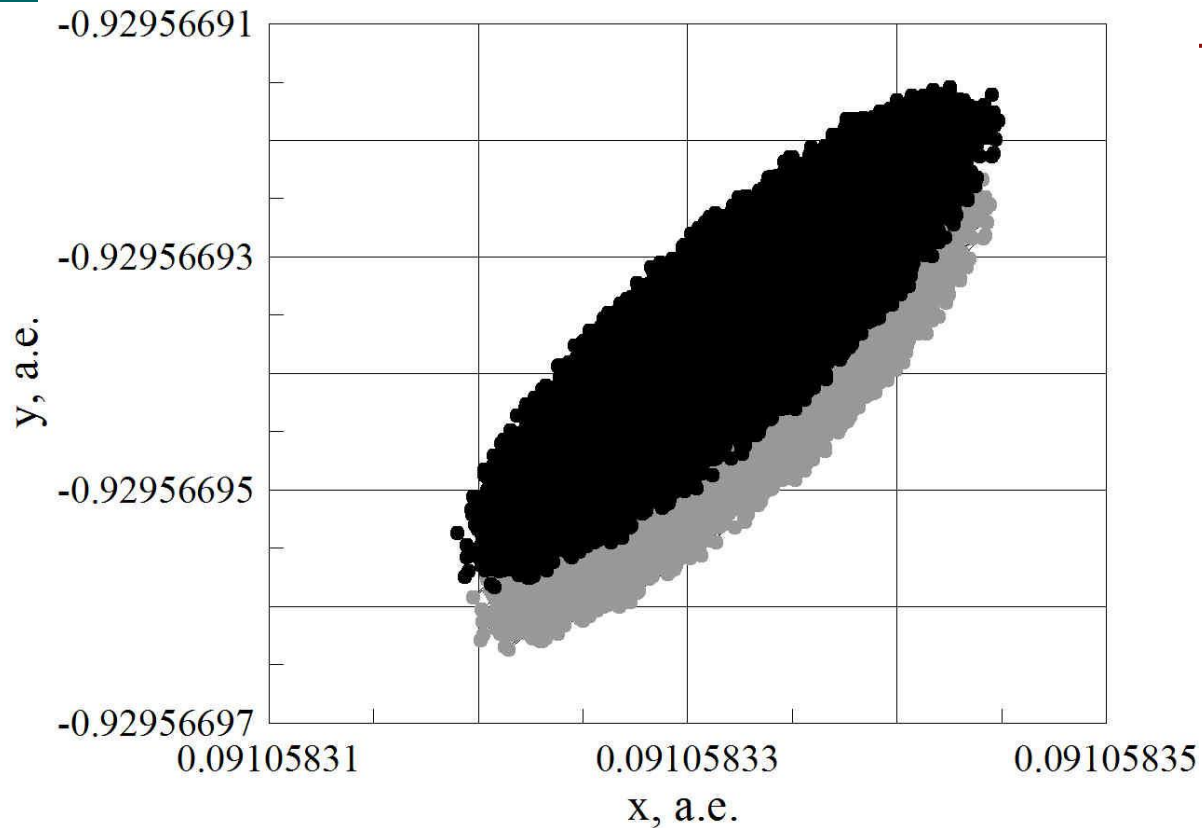
Объект	N	ΔT , сут.	Момент сближения и минимальное расстояние до Земли	
			t	27.06.2011
2011 MD	1555	74.2	r_{min} , а.е.	0.00012466

Астероид был открыт 22 июня 2011 года.
27 июня 2011 астероид 2011 MD прошел относительно близко к поверхности Земли - на расстоянии около 12000 км.

После тесного сближения с Землей астероид увеличил орбитальный период с 380 дней до 396 дней.



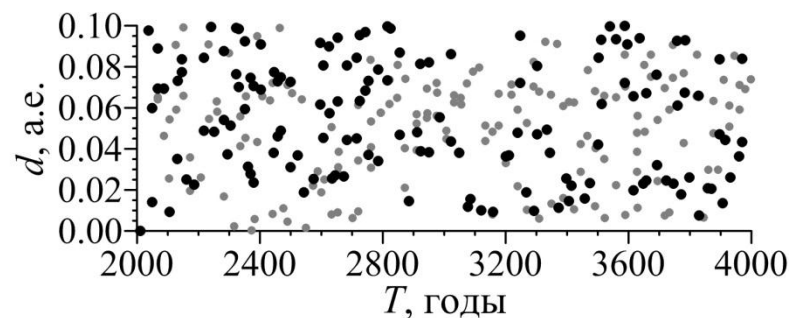
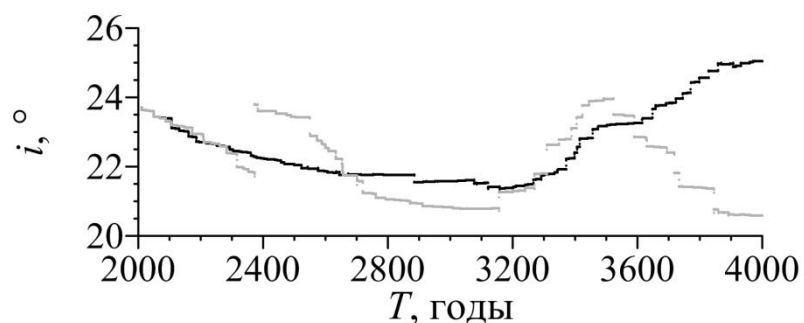
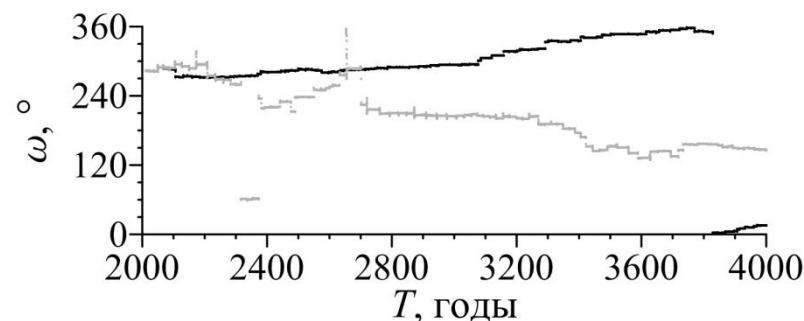
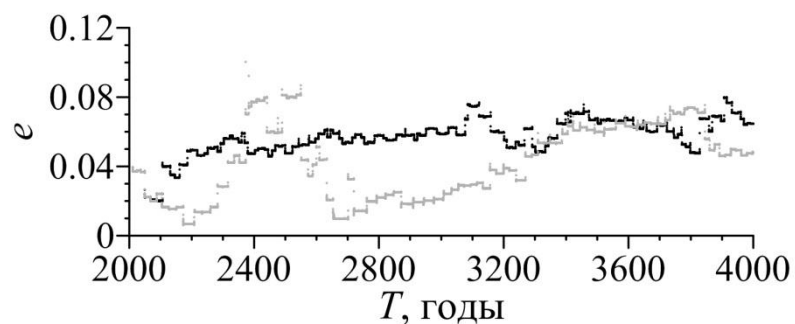
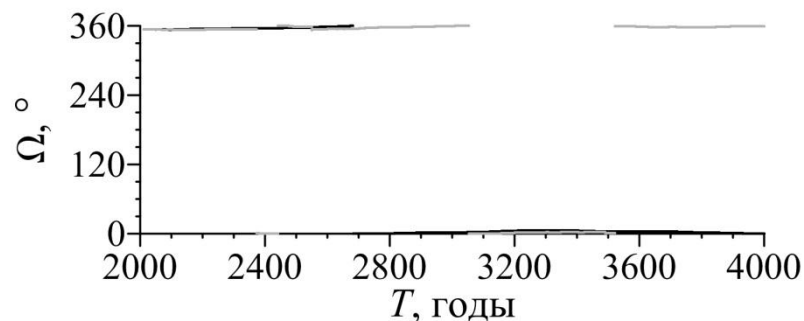
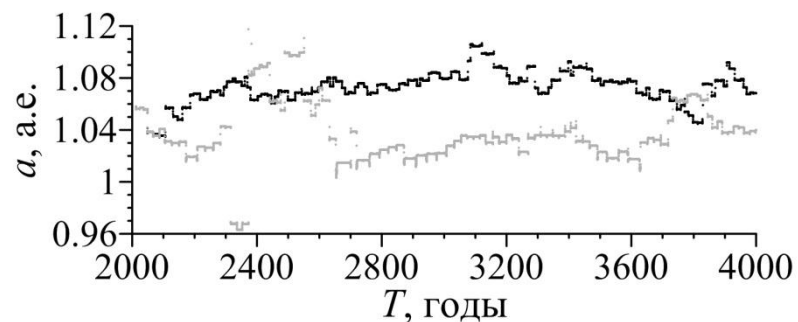
2011 MD



Объект	
Возмущение	2011 MD
Луна	13.317
Сжатие Земли	0.461
Сжатие Солнца	$1 \cdot 10^{-6}$
Релятивистские эффекты от Солнца	$1 \cdot 10^{-5}$

Рис 5. Начальные доверительные области для астероида 2011 MD для полной модели (черный цвет) и без учета возмущения от сжатия Земли (серый цвет).

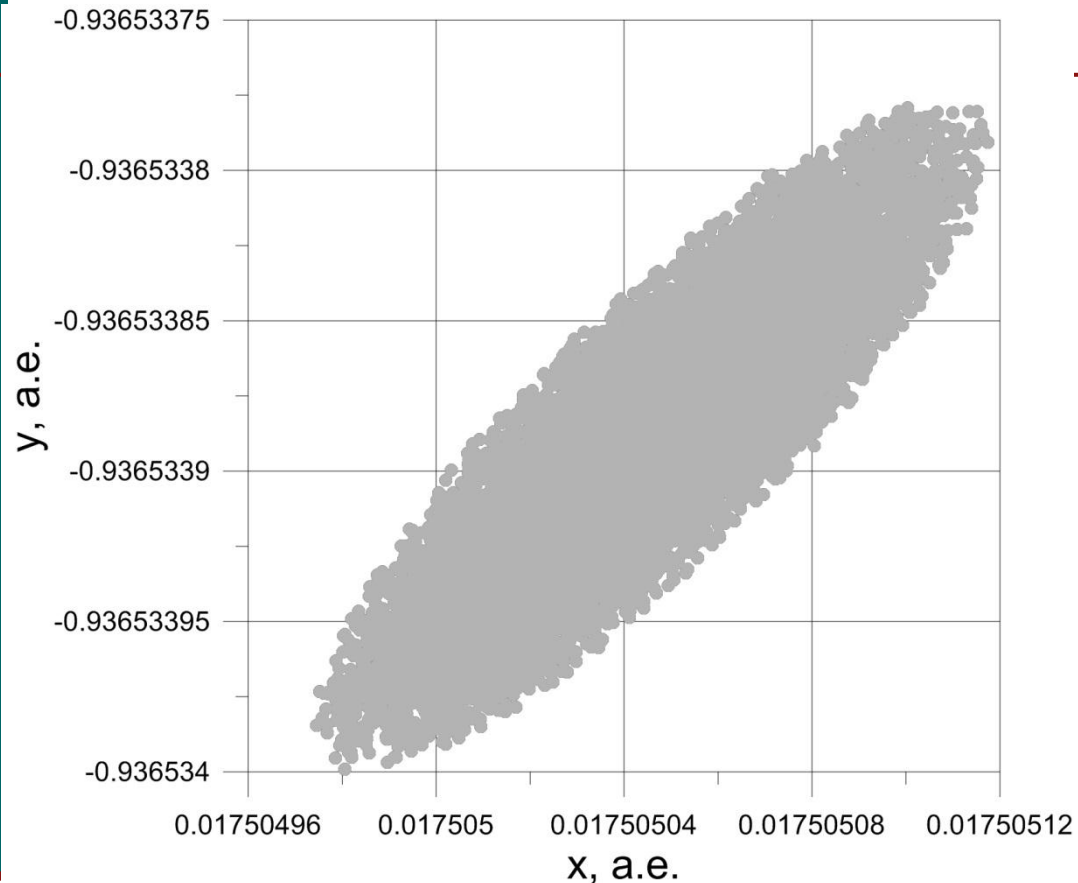
Эволюция орбитальных элементов астероида 2011 MD



Орбитальные элементы для полной модели (черный цвет) и без учета возмущения от сжатия Земли (серый цвет), а так же сближения с Землей («•»).



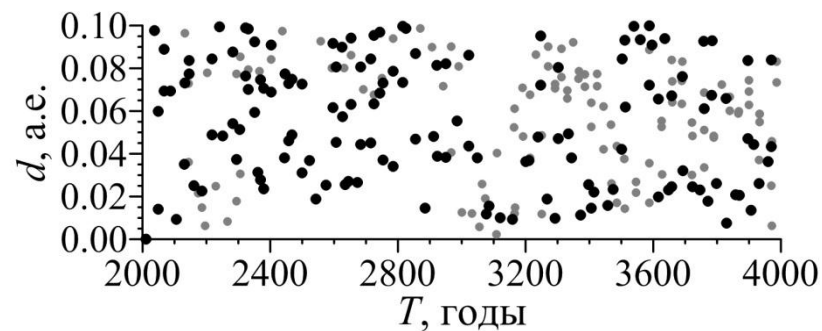
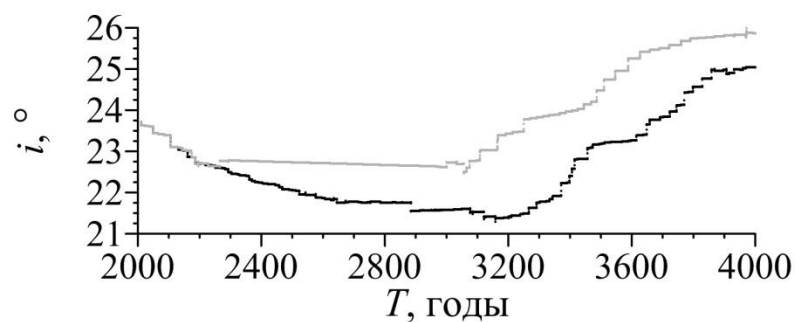
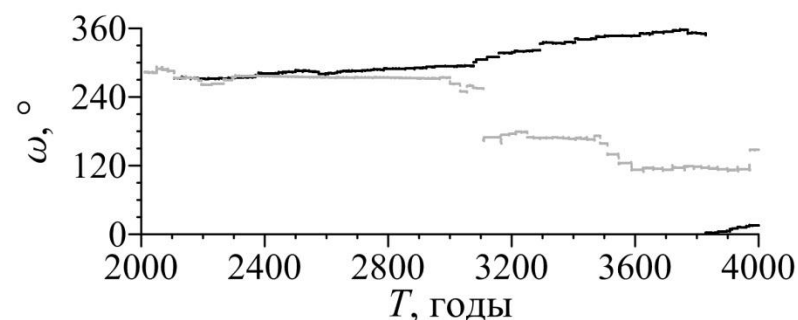
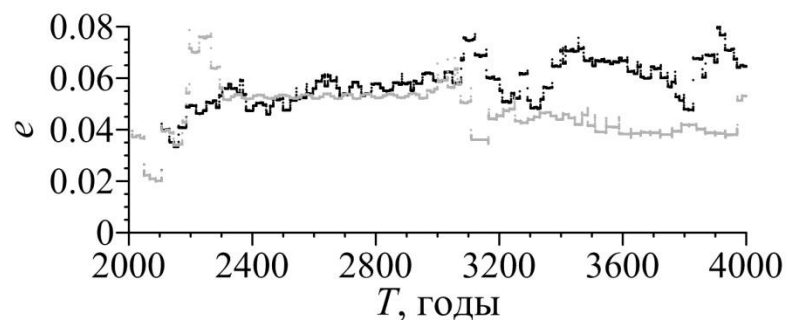
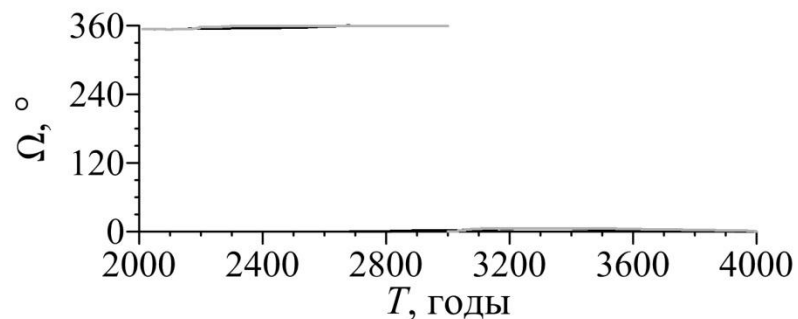
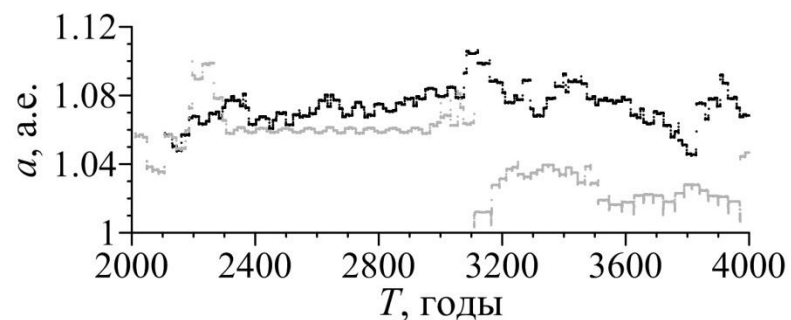
2011 MD



Объект	
Возмущение	2011 MD
Луна	13.317
Сжатие Земли	0.461
Сжатие Солнца	$1 \cdot 10^{-6}$
Релятивистские эффекты от Солнца	$1 \cdot 10^{-5}$

Рис 5. Начальные доверительные области для астероида 2011 MD для полной модели (черный цвет) и без учета возмущения от сжатия Солнца (серый цвет).

Эволюция орбитальных элементов астероида 2011 MD



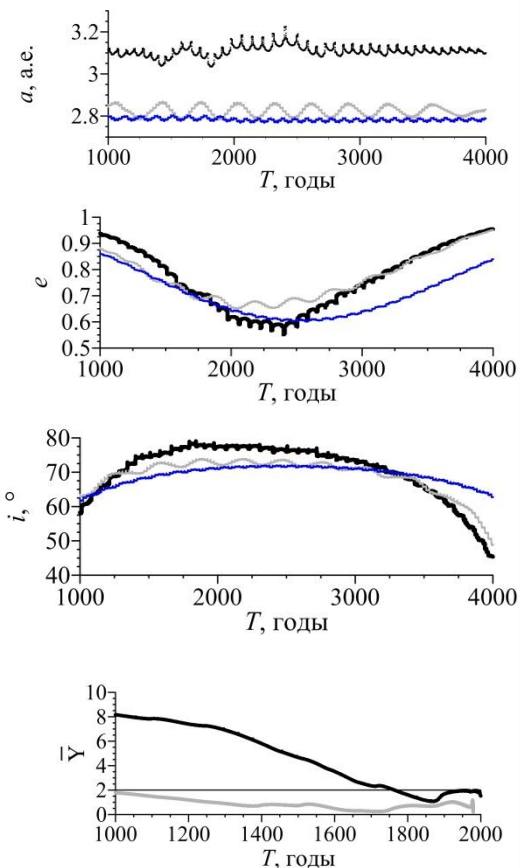
Орбитальные элементы для полной модели (черный цвет) и без учета возмущения от сжатия Солнца (серый цвет), а так же сближения с Землей («•»).



	Дата	a (a.e)	e	i (°)	Ω (°)	ω (°)
2003EH1	11 ноября 2006	3.12638138	0.61839595	70.776302	282.9577	171.334
EN030109	03 января 2009	2.86	0.656	72.18	283.393	176.66
EN040180	04 января 1980	2.79	0.65	70.98	283.7938	168.51

Данные для двух высокоточных метеоров, сфотографированных с нескольких станций чешской части Европейской метеорной сети. Оба метеороида принадлежат ядру потока Квадрантид, т.е. наблюдались в день пика потока.

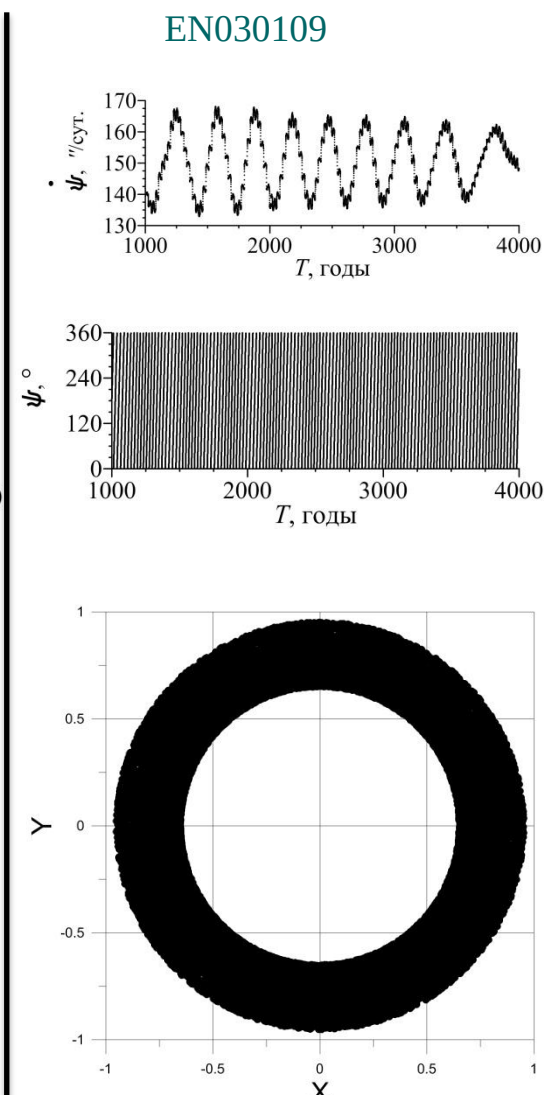
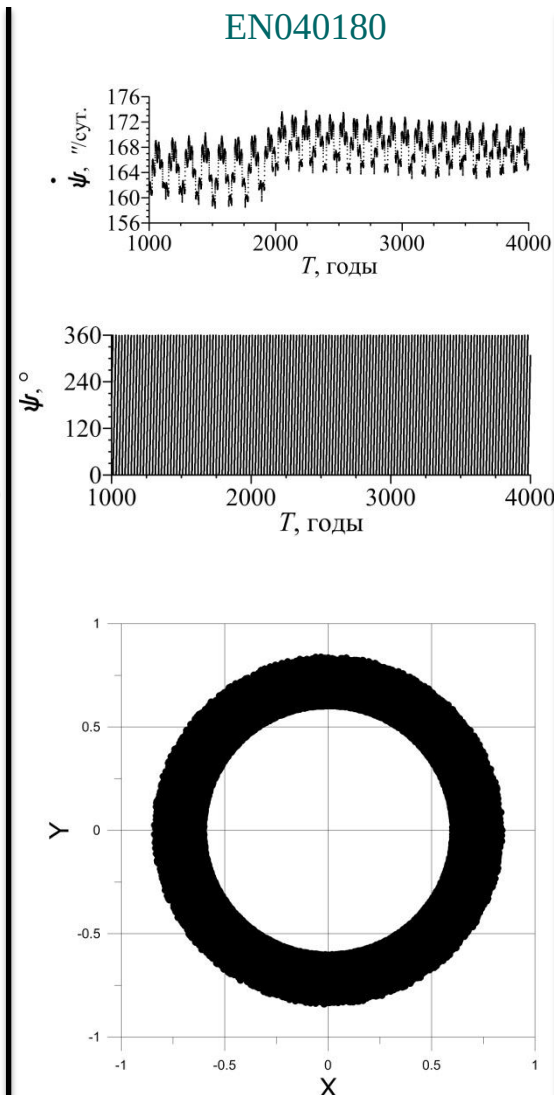
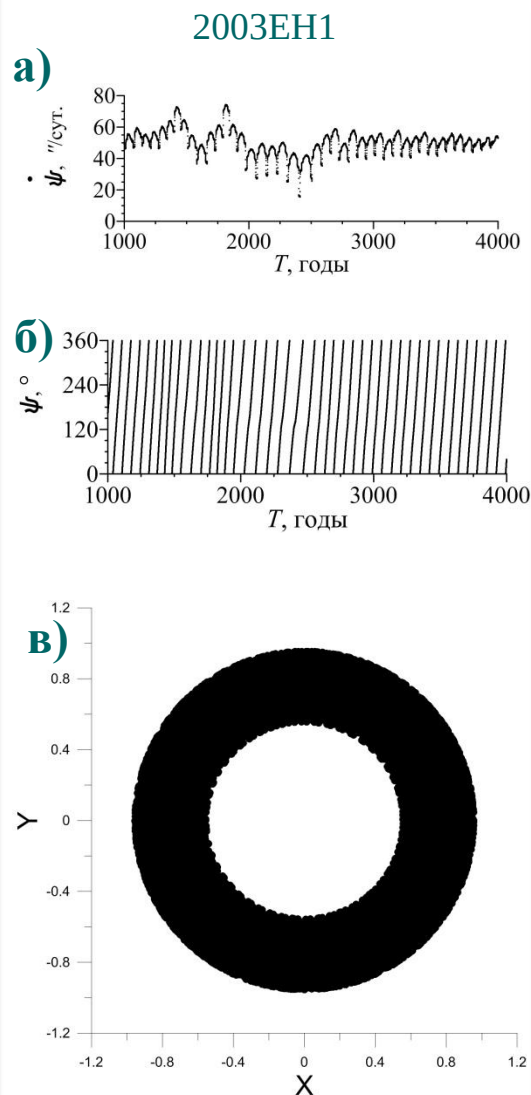
Эволюция большой
полуоси a , эксцентриситета
 e , наклона i , и
параметра MEGNO ($Y(t)$)
для объекта 2003ЕН1



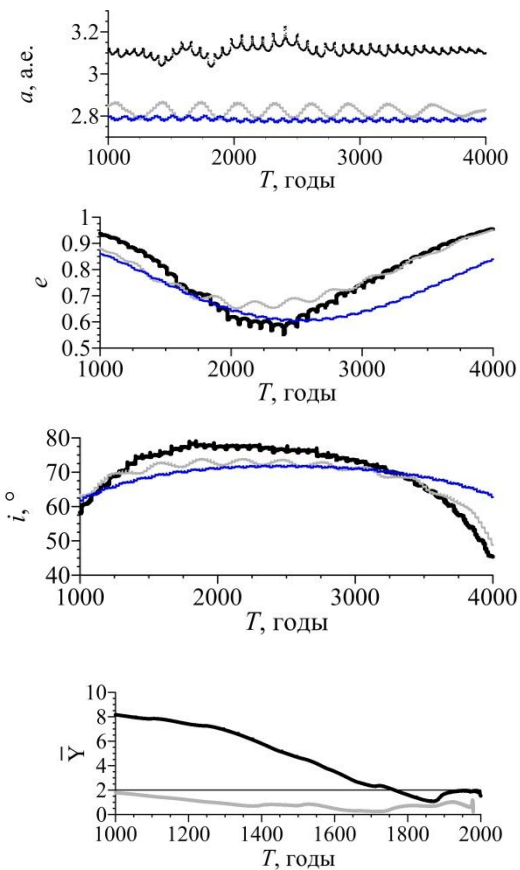
2003ЕН1 – черный цвет,
EN040180 – синий цвет,
EN030109 – серый цвет.

Эволюция (а) - резонансных соотношений,
(б) - соответствующих им критических аргументов,
(в) - фазовый портрет в плоскости $x = e \cos \psi$, $y = e \sin \psi$.

Астероид, не захвачен в резонанс 2/1 с Юпитером, но движется в его окрестности



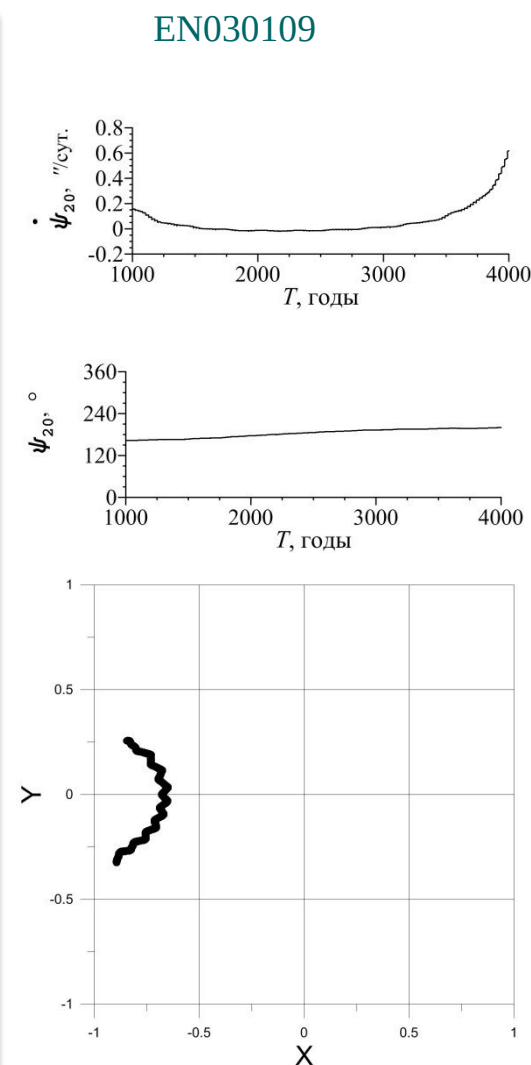
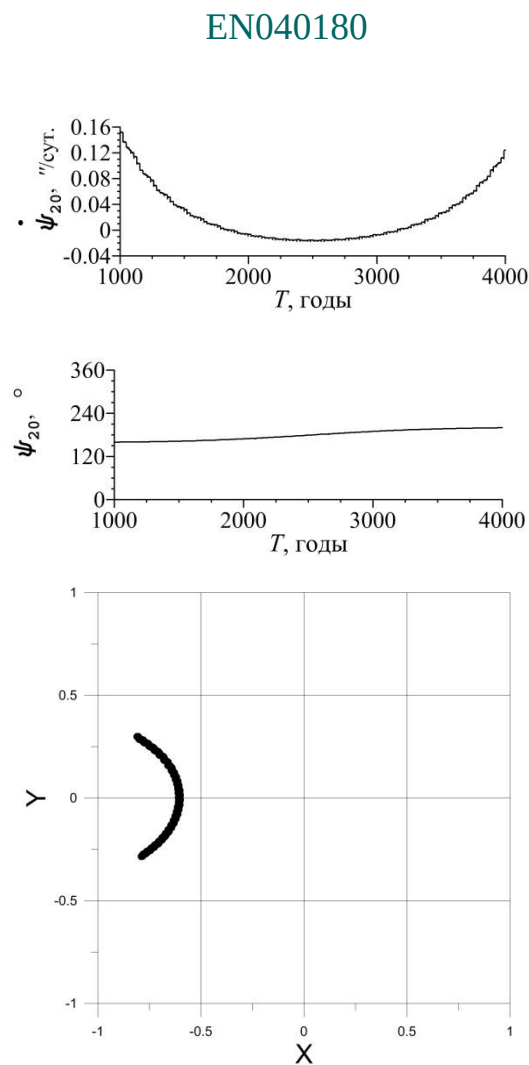
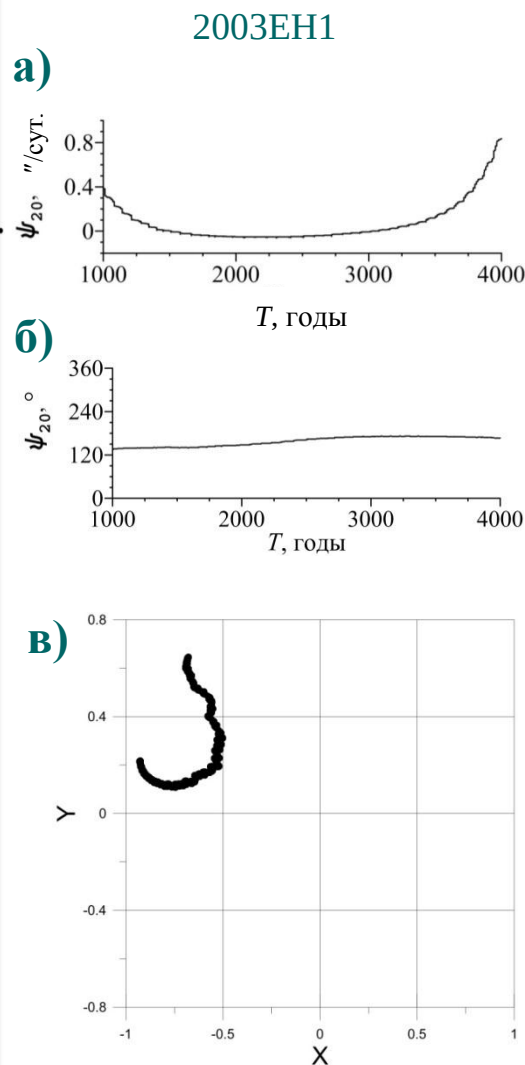
Эволюция большой
полуоси a , эксцентриситета
 e , наклона i , и
параметра MEGNO ($Y(t)$)
для объекта 2003ЕН1



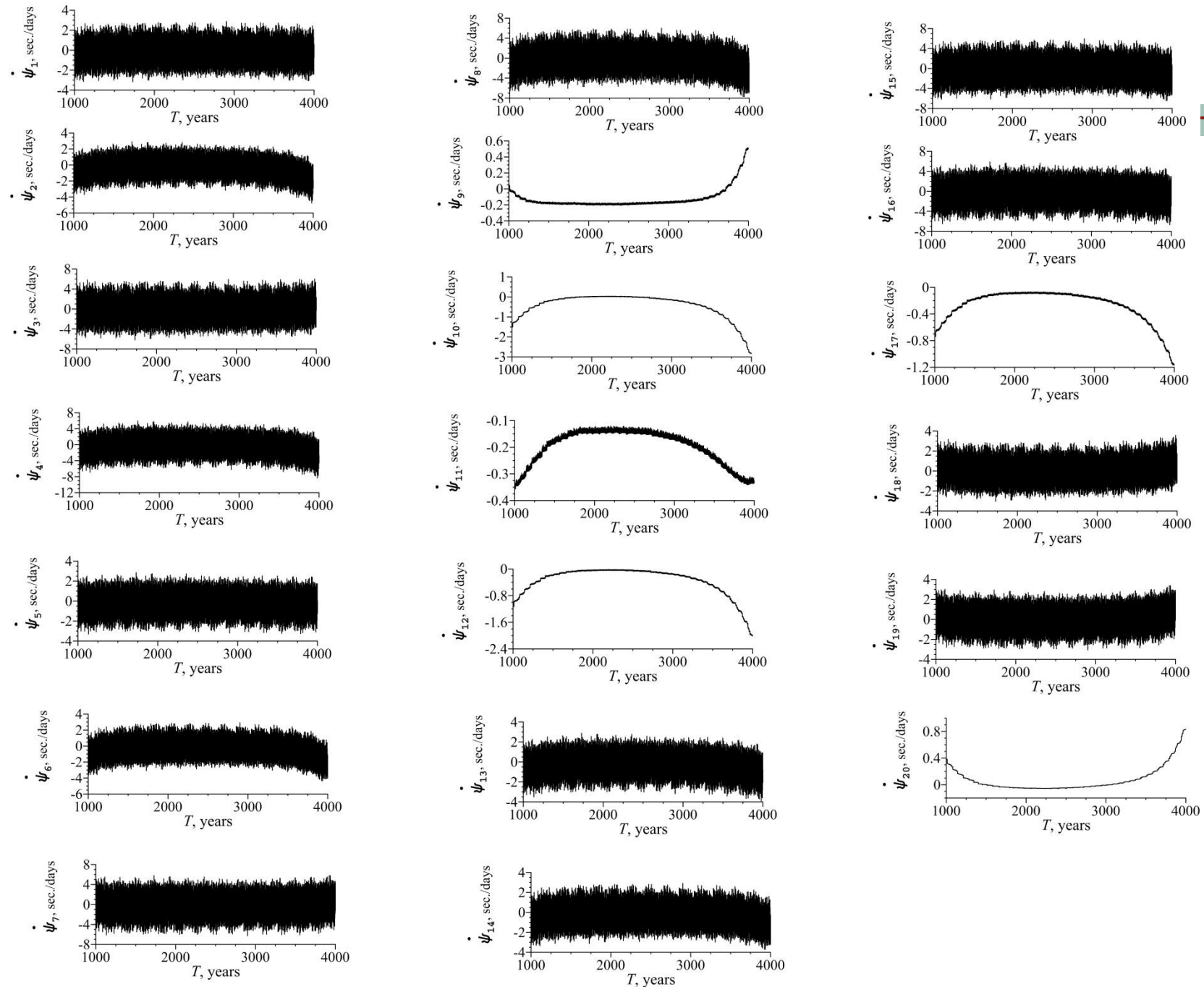
2003ЕН1 – черный цвет,
EN040180 – синий цвет,
EN030109 – серый цвет.

Эволюция (а) - резонансных соотношений,
(б) - соответствующих им критических аргументов,
(в) - фазовый портрет в плоскости $x = e \cos \psi_{20}$, $y = e \sin \psi_{20}$.

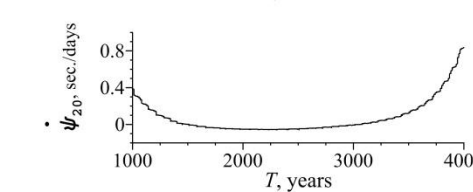
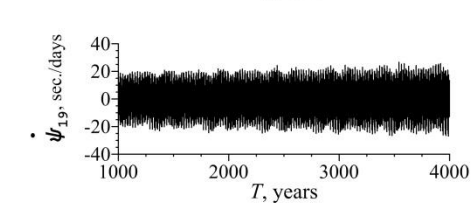
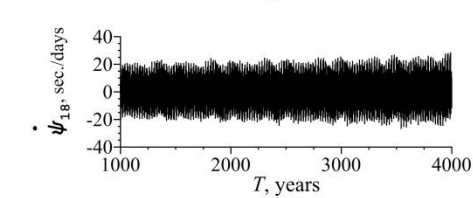
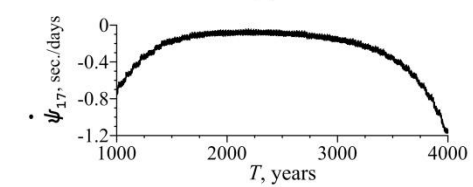
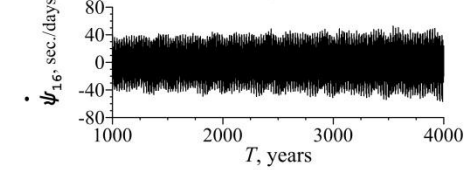
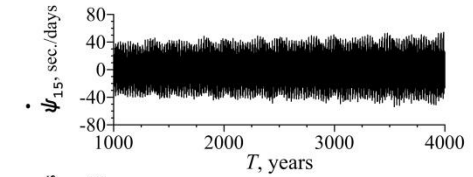
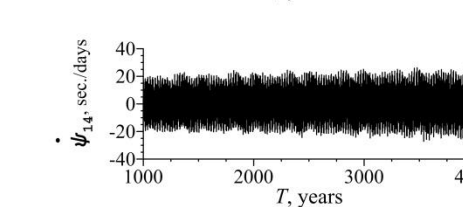
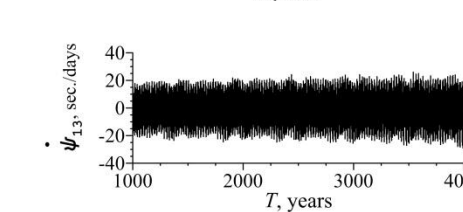
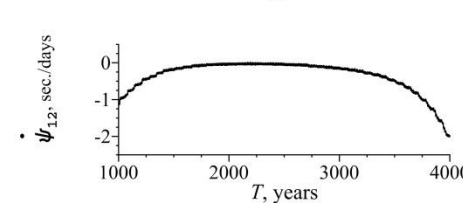
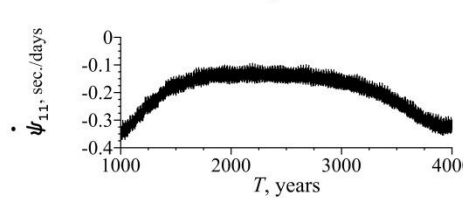
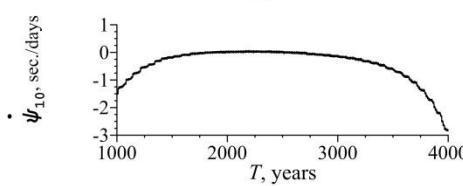
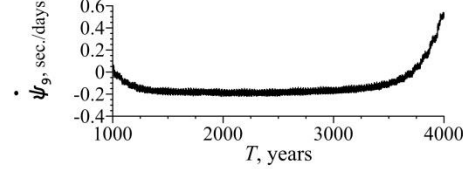
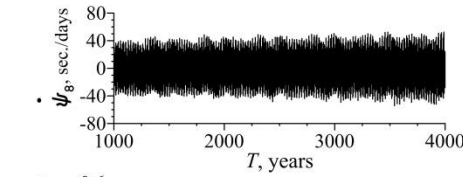
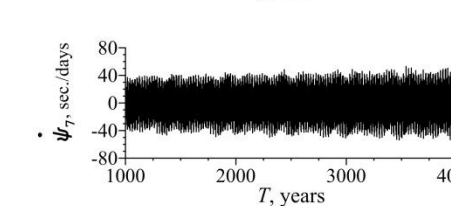
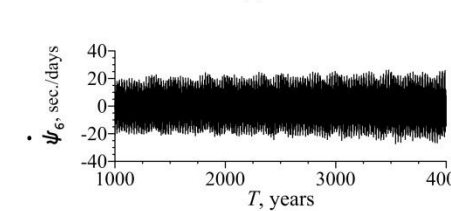
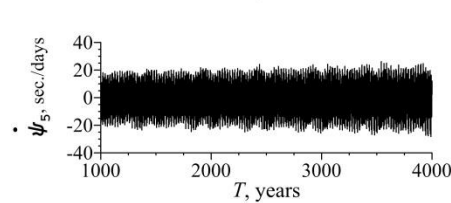
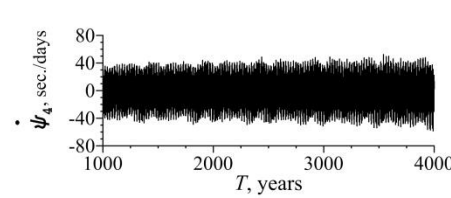
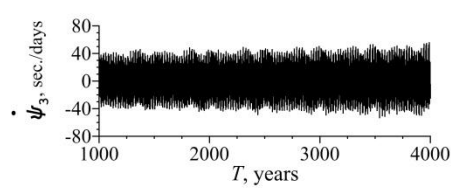
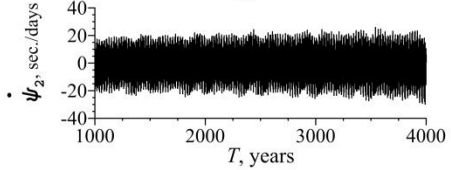
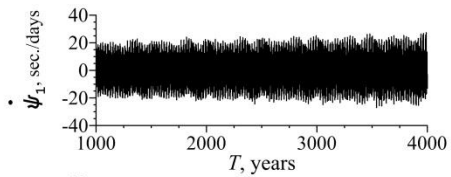
$$\dot{\psi}_{20} = \dot{\omega}$$



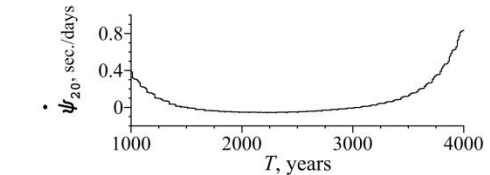
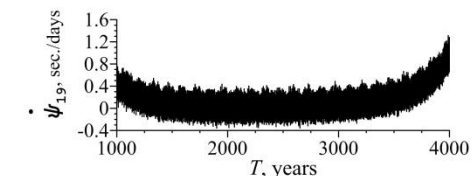
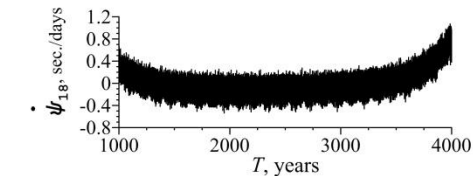
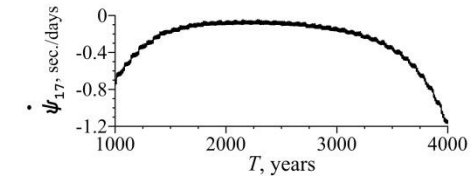
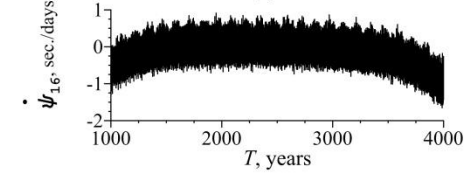
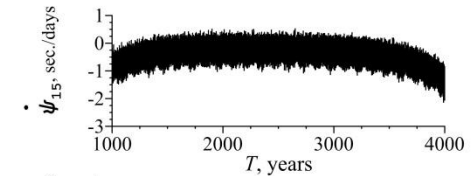
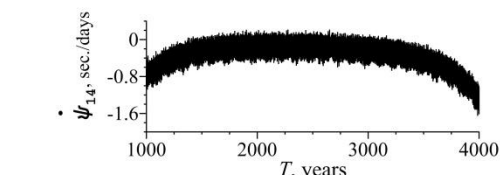
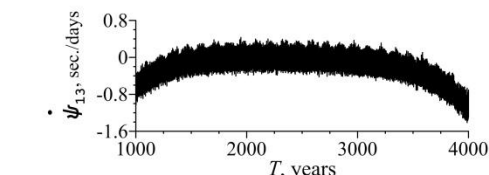
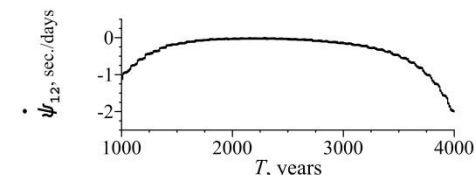
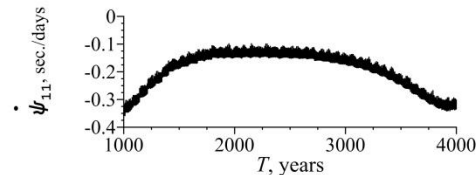
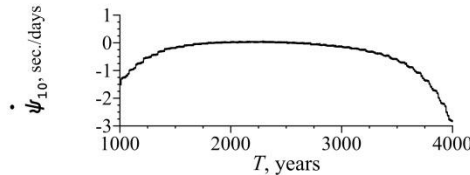
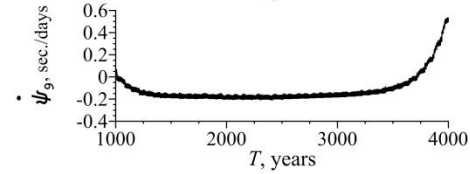
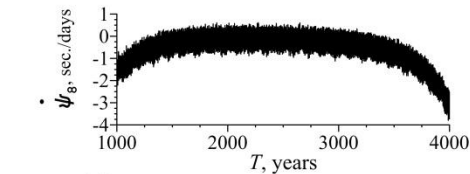
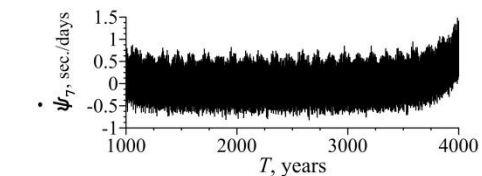
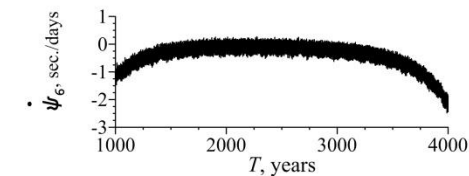
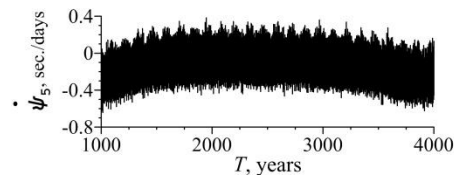
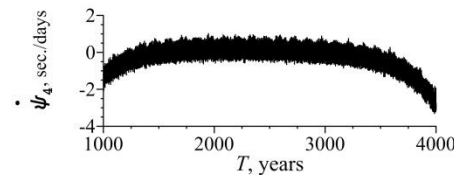
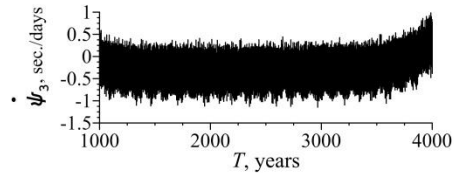
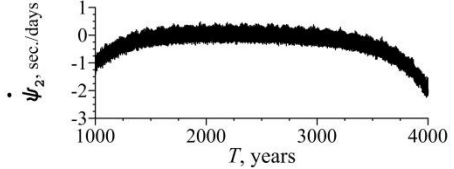
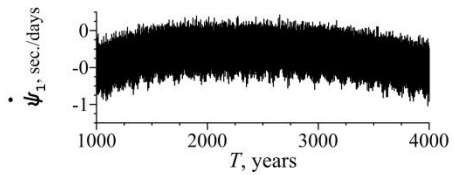
Эволюция резонансных соотношений с Марсом.



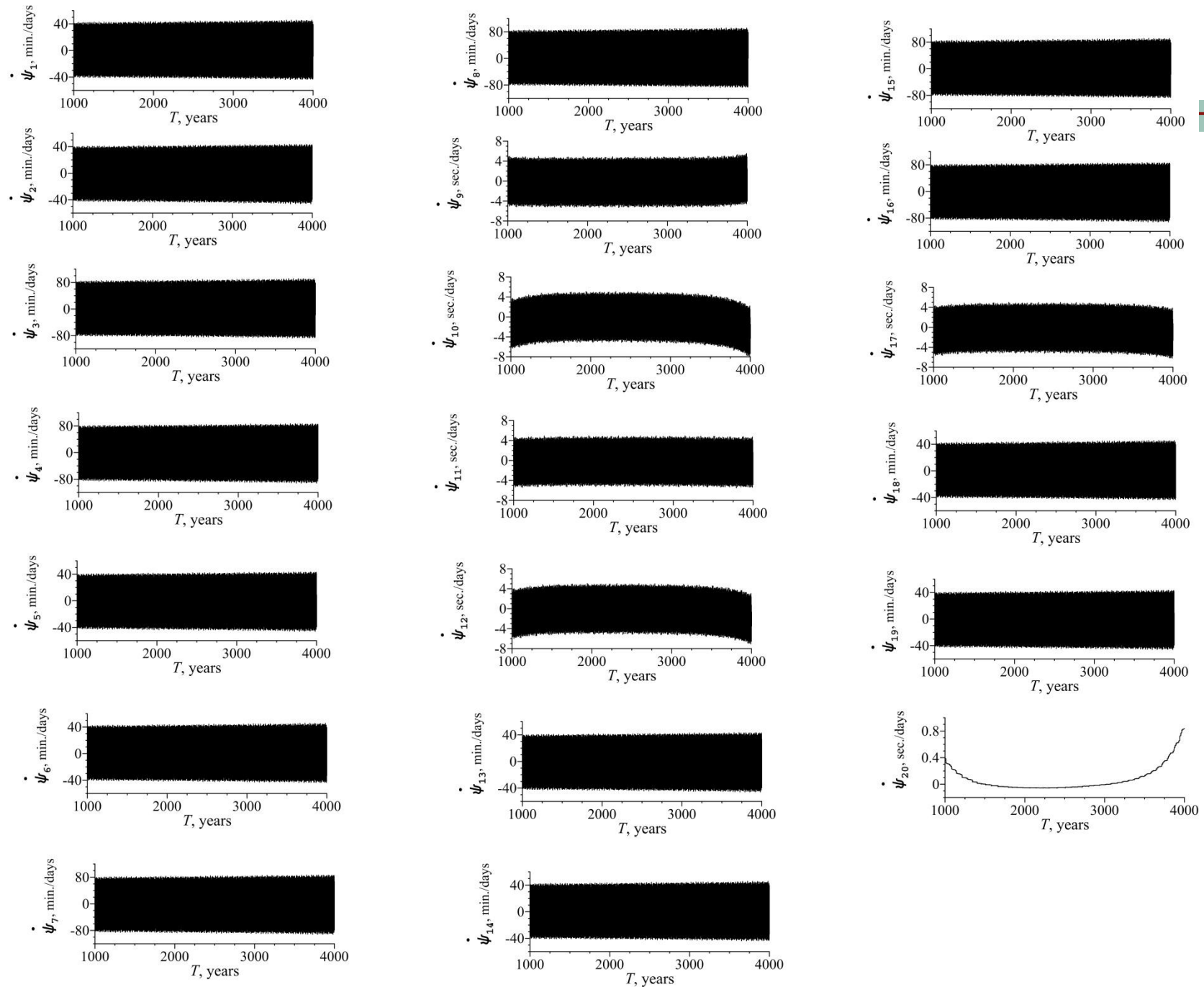
Эволюция резонансных соотношений с Венерой.



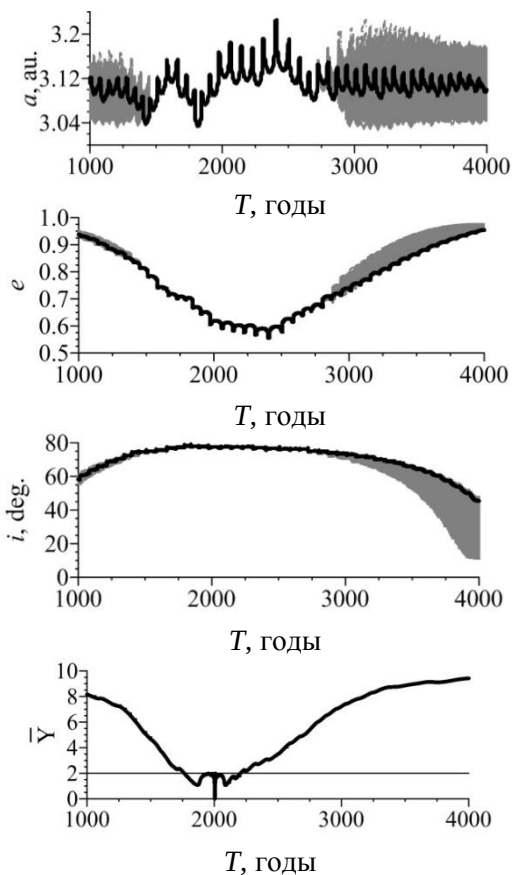
Эволюция резонансных соотношений с Меркурием.



Эволюция резонансных соотношений с Землей.

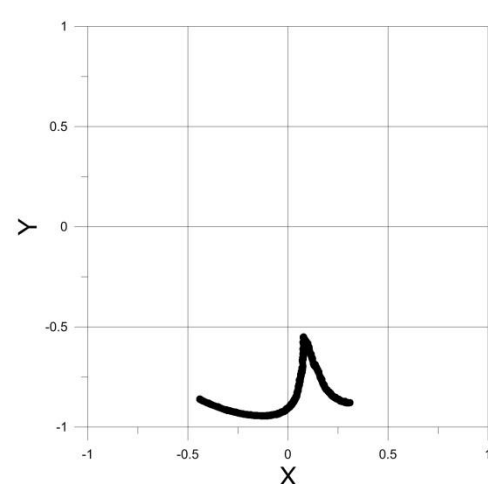
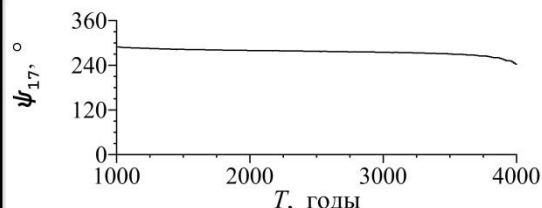
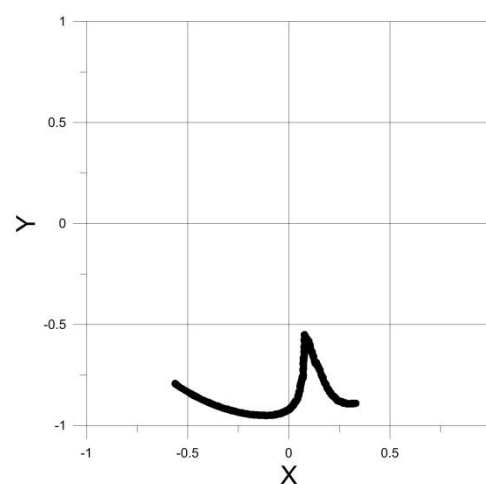
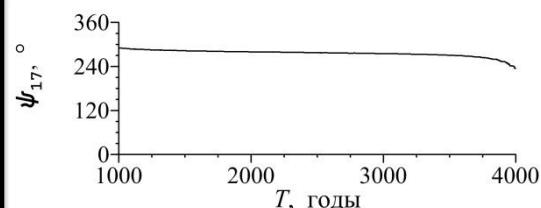
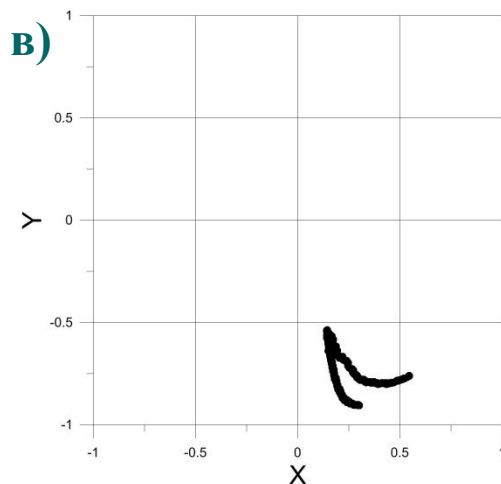
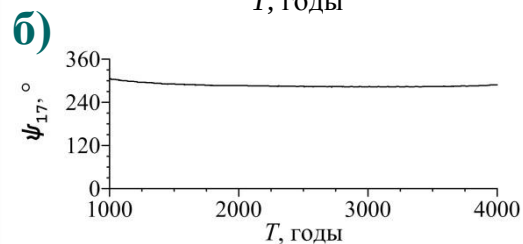
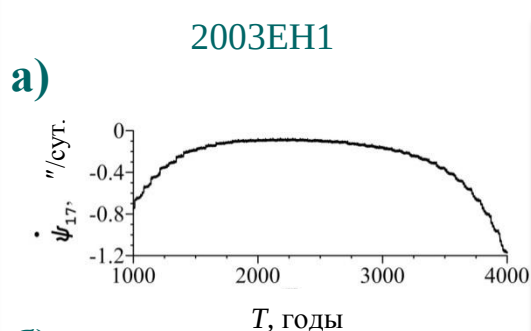


Эволюция большой
полуоси a , эксцентриситета
 e , наклона i , и
параметра MEGNO ($Y(t)$)
для объекта 2003 EH1

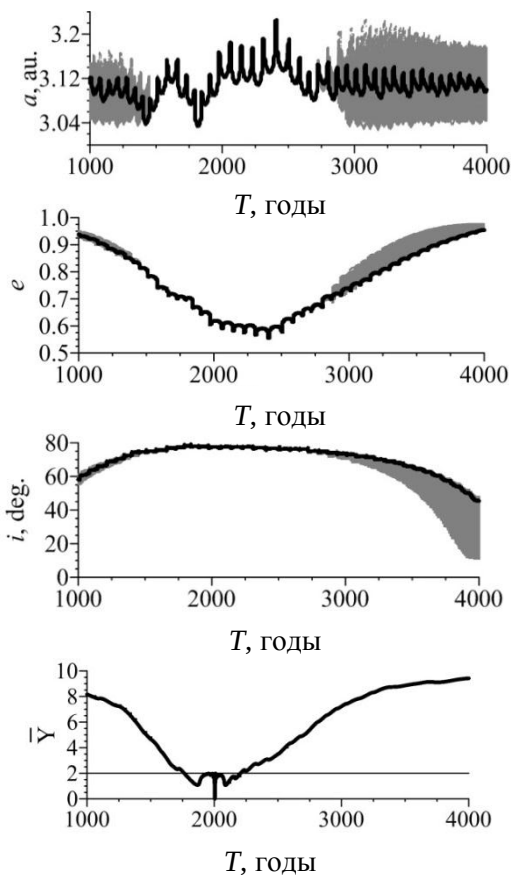


Эволюция (а) - резонансных соотношений,
(б) - соответствующих им критических аргументов,
(в) - фазовый портрет в плоскости $x = e \cos \psi_{17}$, $y = e \sin \psi_{17}$.

$$\dot{\psi}_{17} = (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{Jup})$$



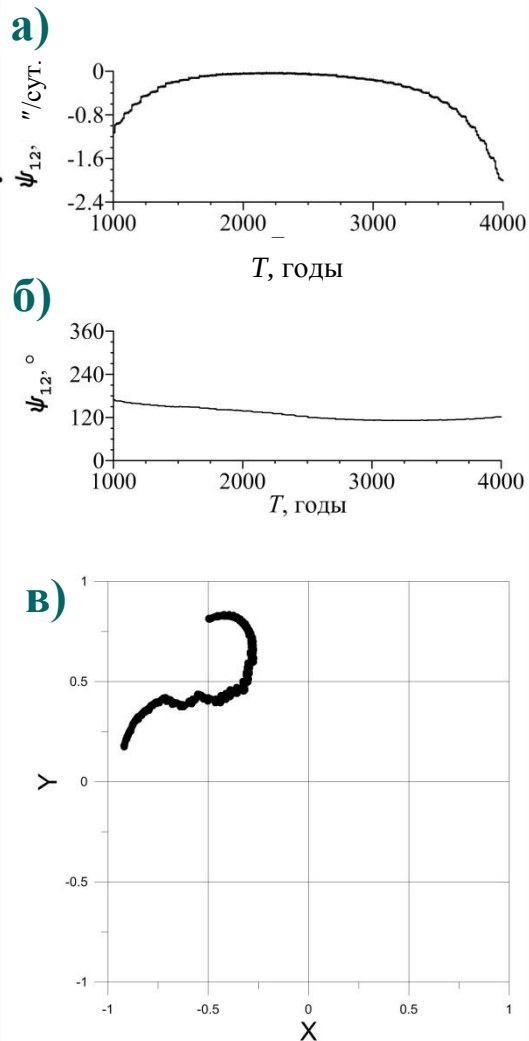
Эволюция большой
полуоси a , эксцентриситета
 e , наклона i , и
параметра MEGNO ($Y(t)$)
для объекта 2003 EH1



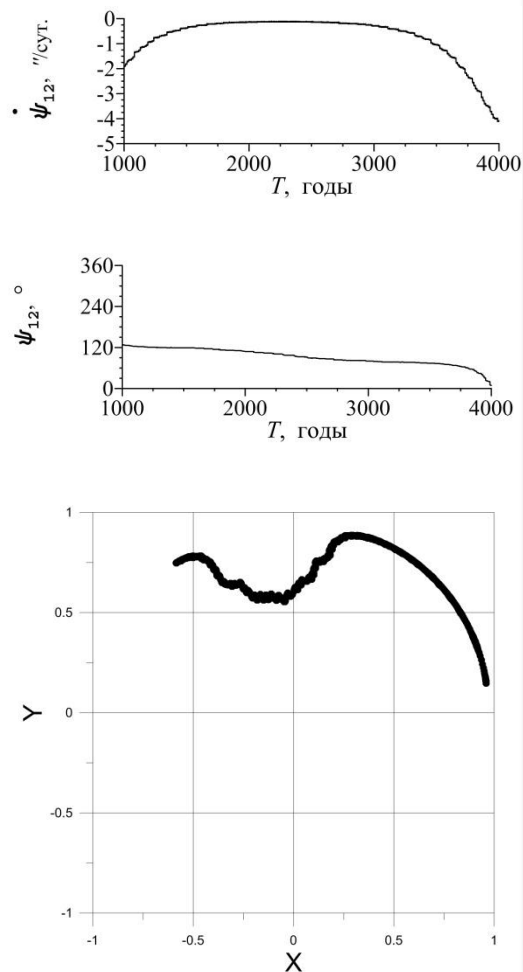
Эволюция (а) - резонансных соотношений,
(б) - соответствующих им критических аргументов,
(в) - фазовый портрет в плоскости $x = e \cos \psi_{12}$, $y = e \sin \psi_{12}$.

$$\dot{\psi}_{12} = (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{Jup}) - \dot{\omega}$$

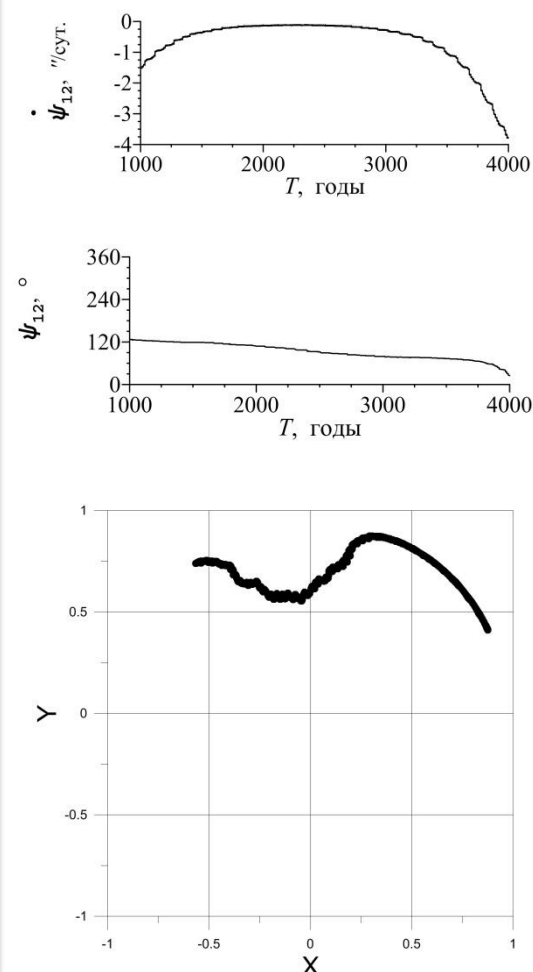
2003EH1



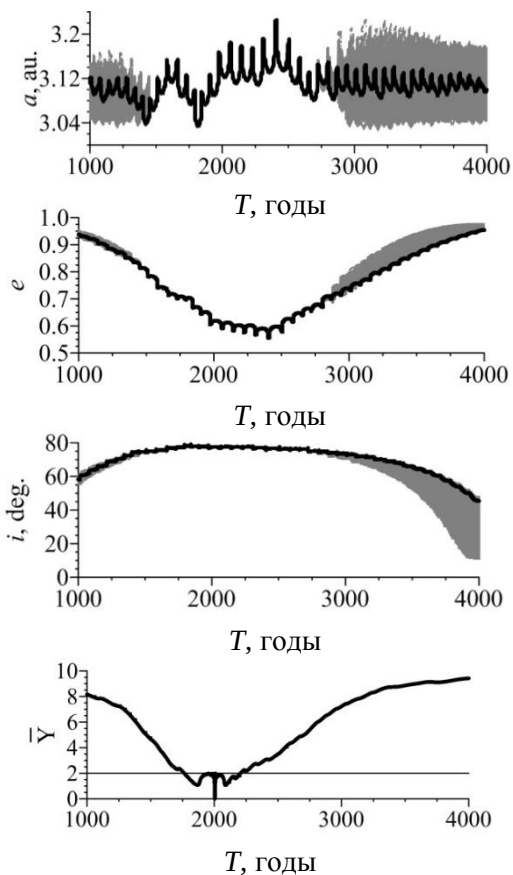
Вершина
дов. области



Точка из области

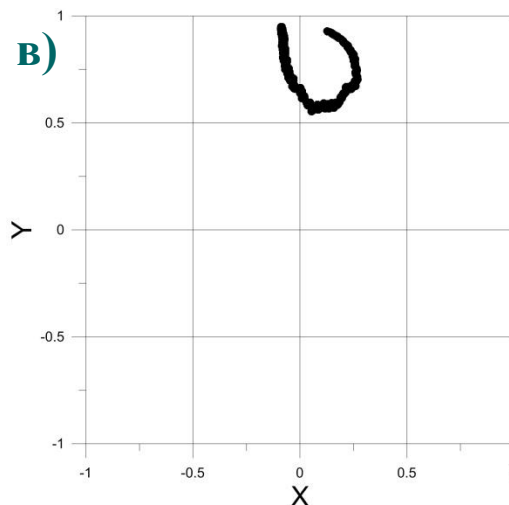
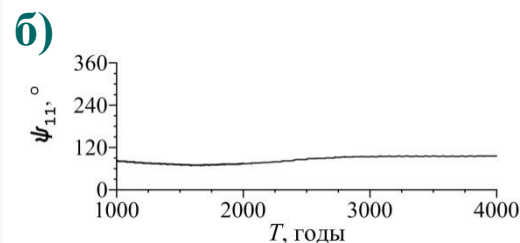
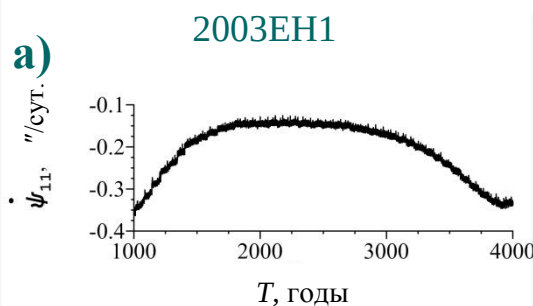


Эволюция большой
полуоси a , эксцентриситета
 e , наклона i , и
параметра MEGNO ($Y(t)$)
для объекта 2003 EH1

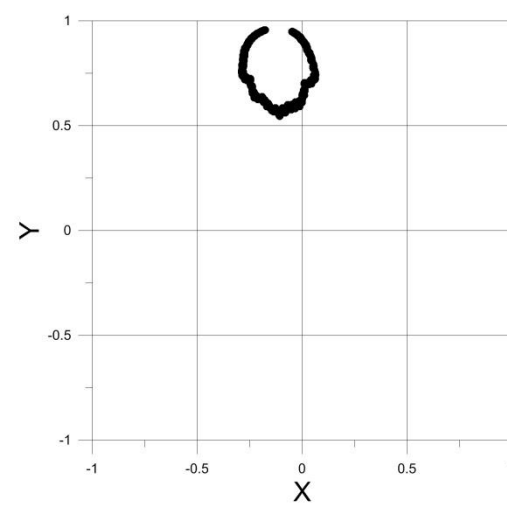
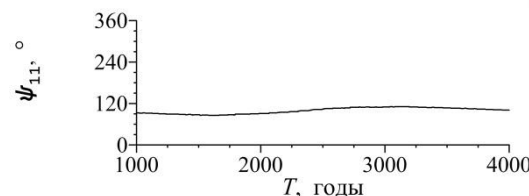
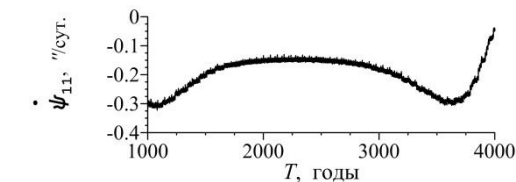


Эволюция (а) - резонансных соотношений,
(б) - соответствующих им критических аргументов,
(в) - фазовый портрет в плоскости $x = e \cos \psi_{11}$, $y = e \sin \psi_{11}$.

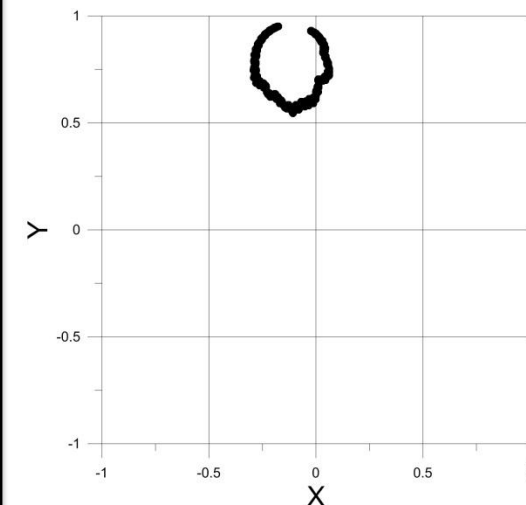
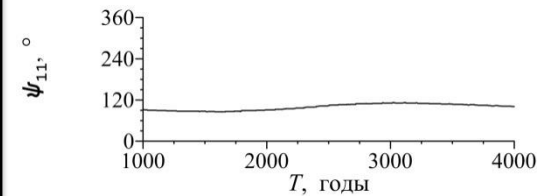
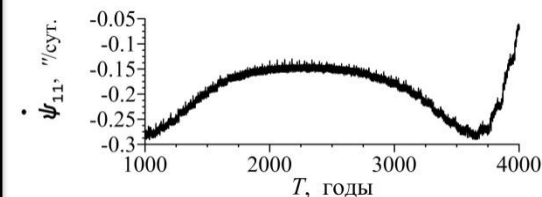
$$\dot{\psi}_{11} = (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{Jup}) + \dot{\omega}$$



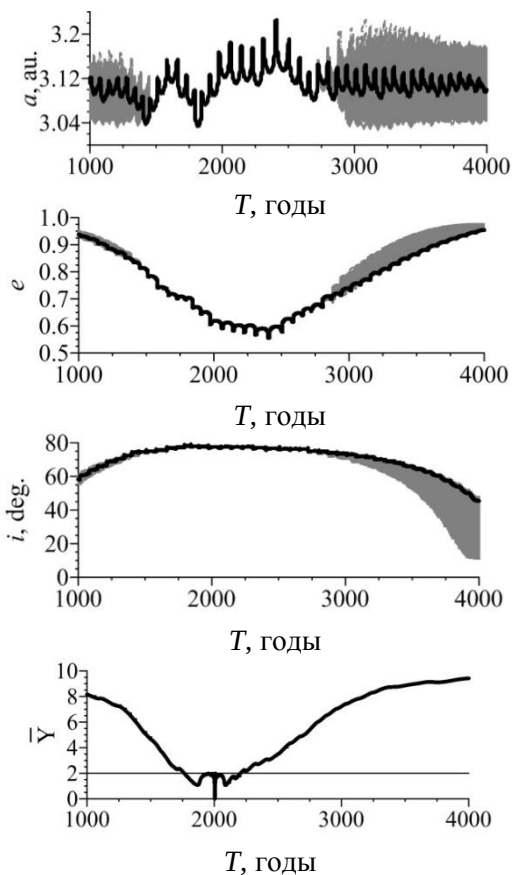
Вершина
дов. области



Точка из области

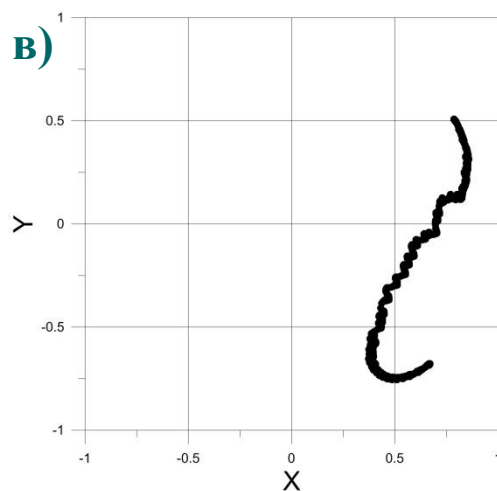
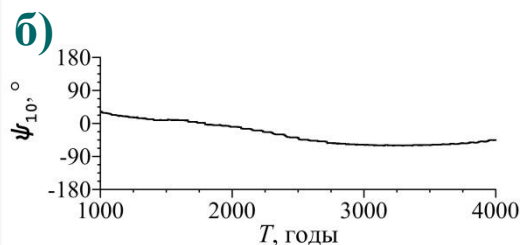
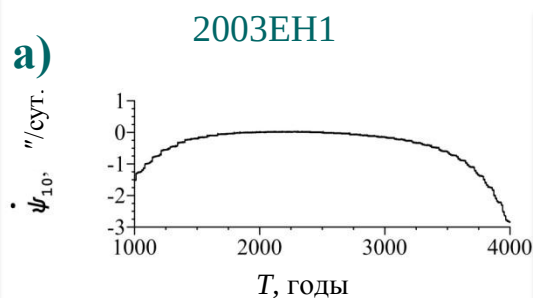


Эволюция большой
полуоси a , эксцентриситета
 e , наклона i , и
параметра MEGNO ($Y(t)$)
для объекта 2003 EH1

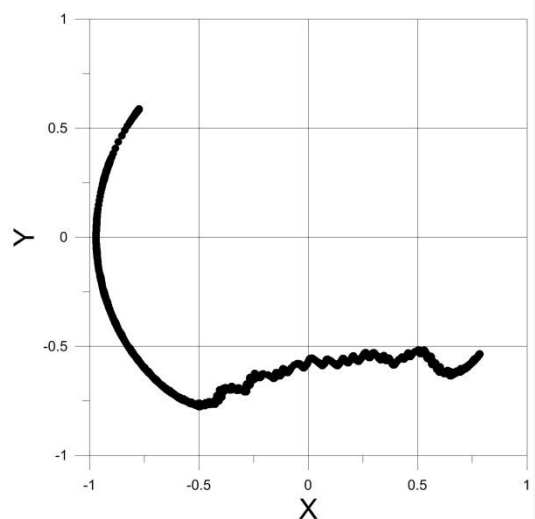
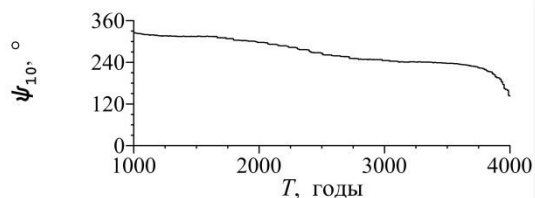
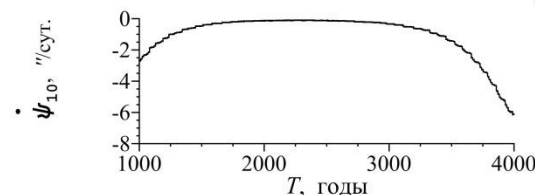


Эволюция (а) - резонансных соотношений,
(б) - соответствующих им критических аргументов,
(в) - фазовый портрет в плоскости $x = e \cos \psi_{10}$, $y = e \sin \psi_{10}$.

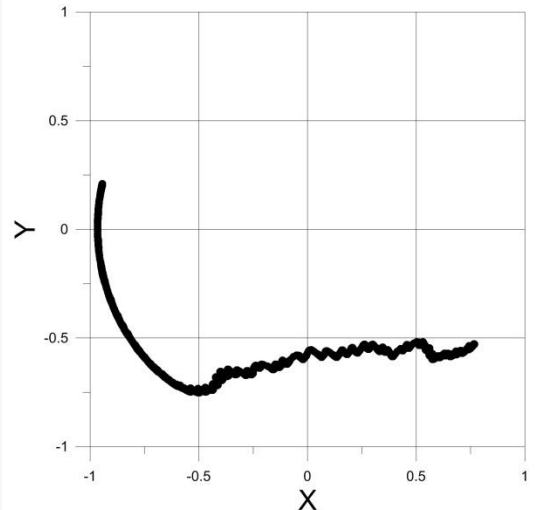
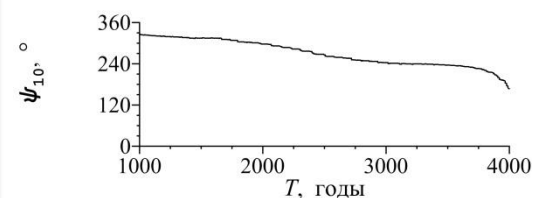
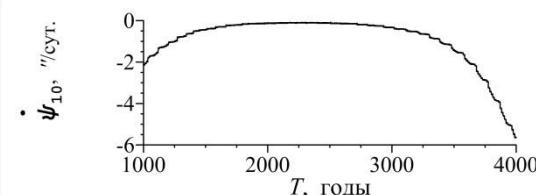
$$\dot{\psi}_{10} = (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{Jup}) - 2\dot{\omega}$$



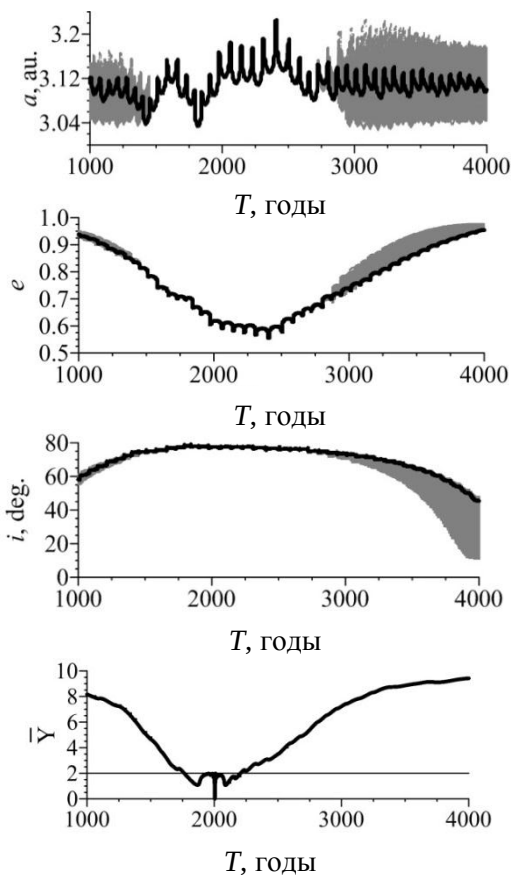
Вершина
дов. области



Точка из области

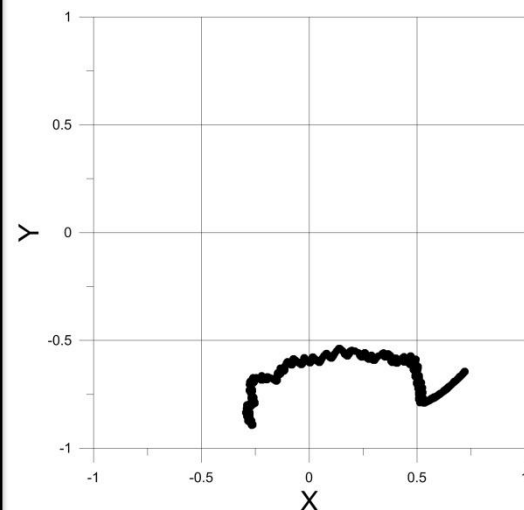
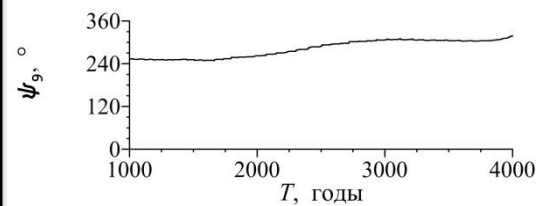
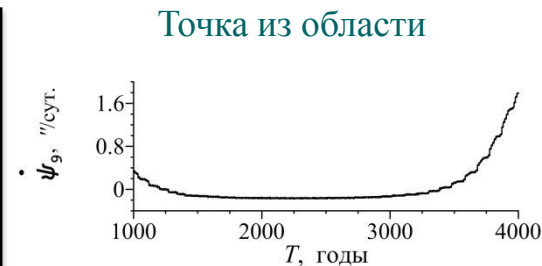
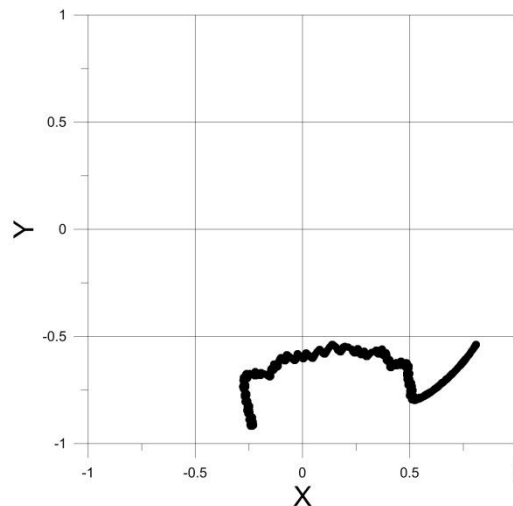
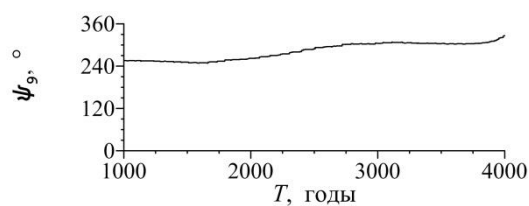
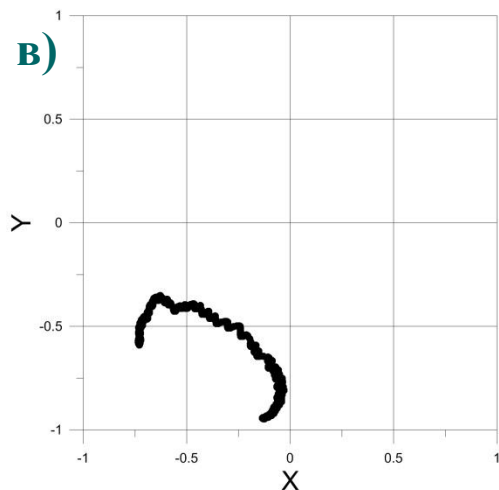
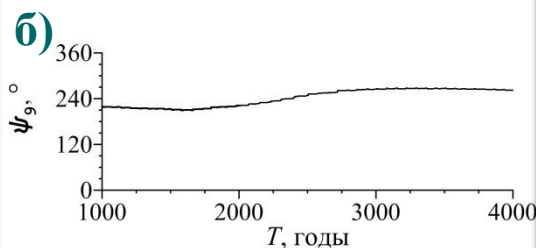
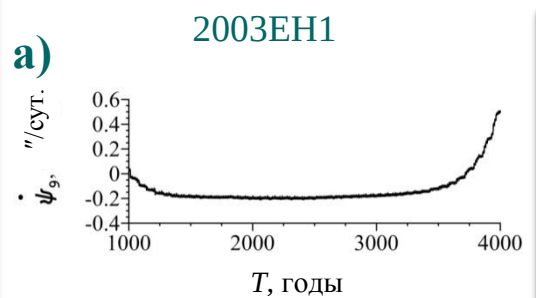


Эволюция большой
полуоси a , эксцентриситета
 e , наклона i , и
параметра MEGNO ($Y(t)$)
для объекта 2003 EH1

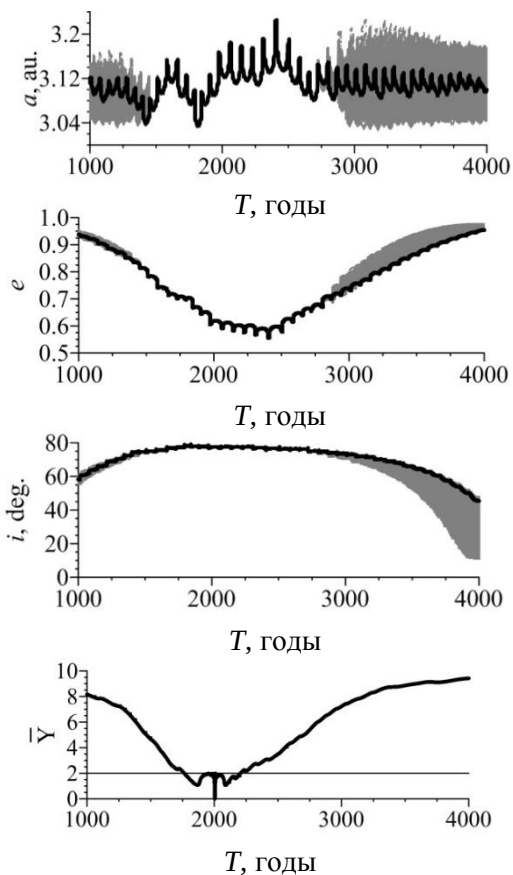


Эволюция (а) - резонансных соотношений,
(б) - соответствующих им критических аргументов,
(в) - фазовый портрет в плоскости $x = e \cos \psi_9$, $y = e \sin \psi_9$.

$$\dot{\psi}_9 = (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{Jup}) + 2\dot{\omega} \approx 0$$

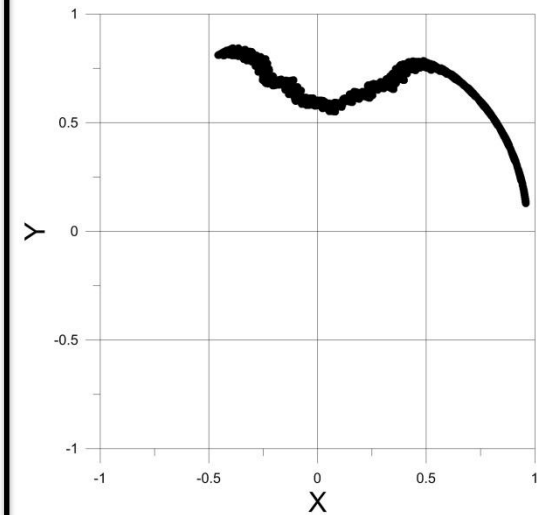
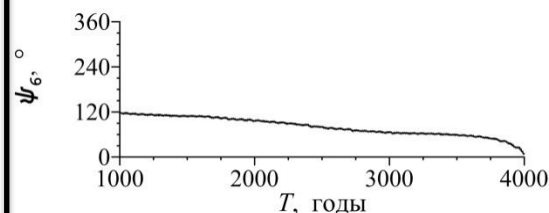
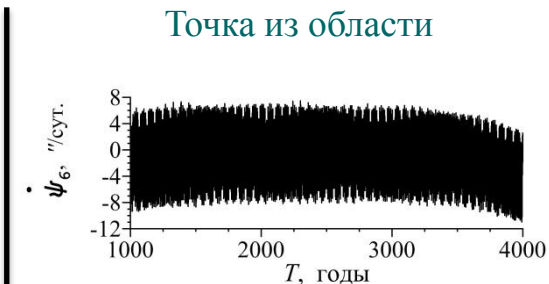
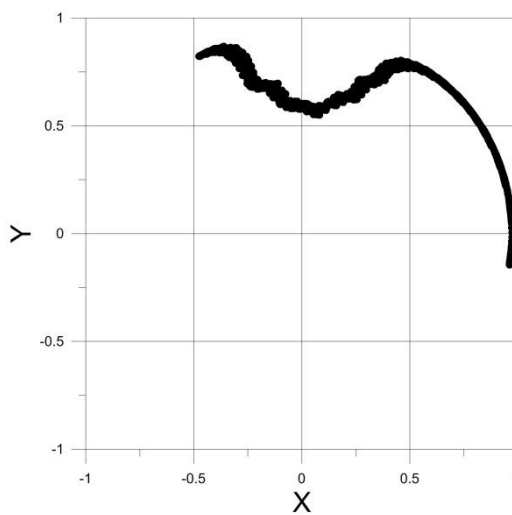
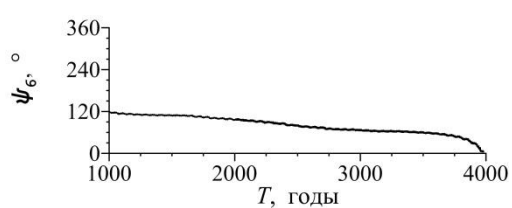
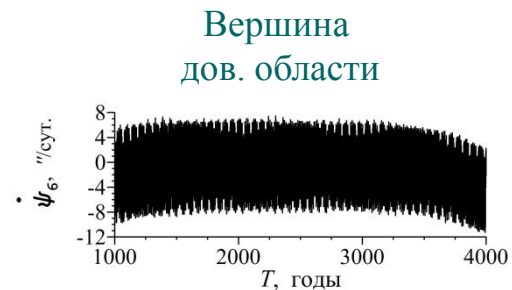
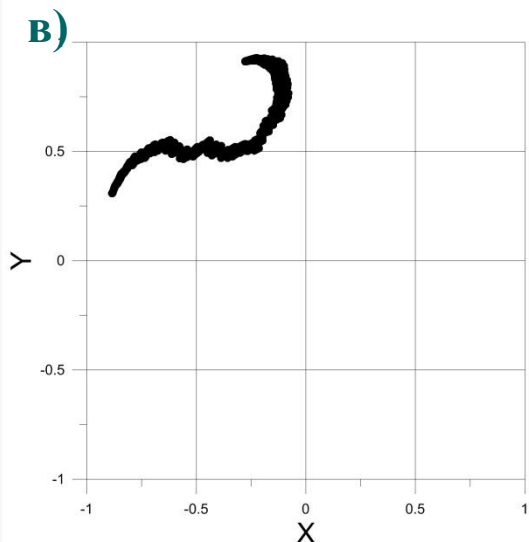
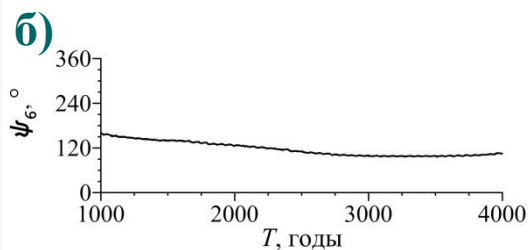
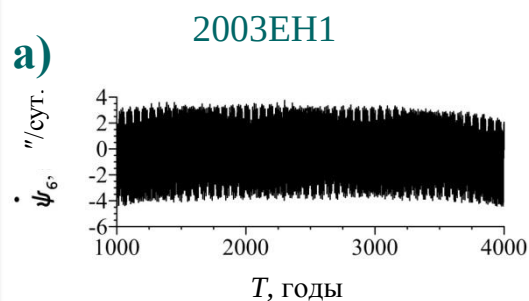


Эволюция большой
полуоси a , эксцентриситета
 e , наклона i , и
параметра MEGNO ($Y(t)$)
для объекта 2003 EH1

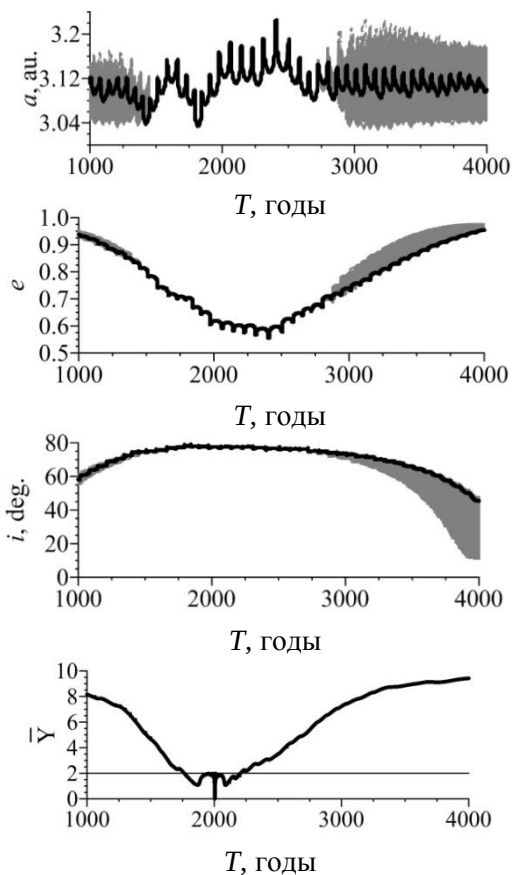


Эволюция (а) - резонансных соотношений,
(б) - соответствующих им критических аргументов,
(в) - фазовый портрет в плоскости $x = e \cos \psi_6$, $y = e \sin \psi_6$.

$$\dot{\psi}_6 = (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{Jup}) - \dot{\omega} - \dot{\omega}'_{Jup}$$



Эволюция большой
полуоси a , эксцентриситета
 e , наклона i , и
параметра MEGNO ($Y(t)$)
для объекта 2003 EH1



Эволюция (а) - резонансных соотношений,
(б) - соответствующих им критических аргументов,
(в) - фазовый портрет в плоскости $x = e \cos \psi$, $y = e \sin \psi$.

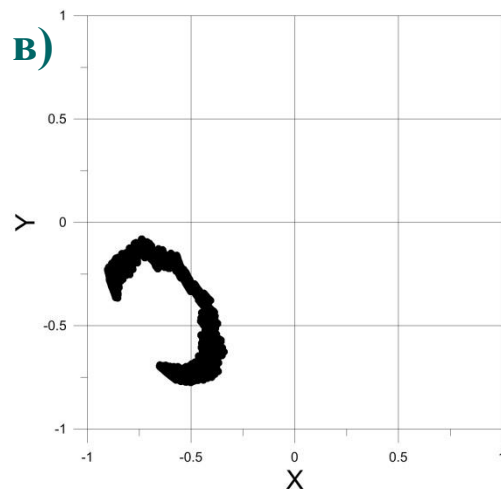
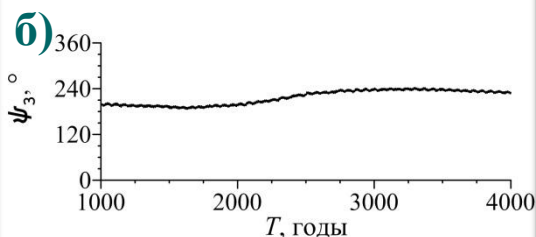
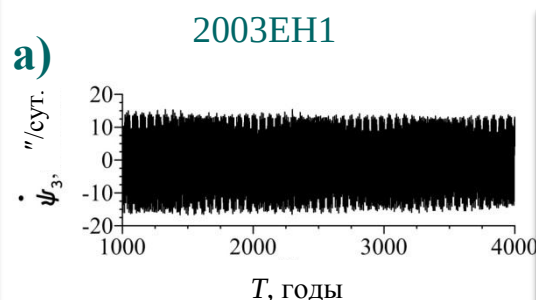
$$\dot{\psi}_3 = (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{Jup}) + 2\dot{\omega} - 2\dot{\omega}'_{Jup}$$

$$\dot{\psi}_4 = (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{Jup}) - 2\dot{\omega} + 2\dot{\omega}'_{Jup}$$

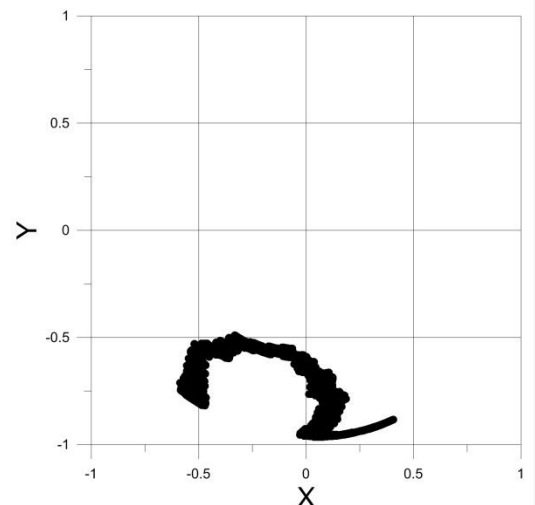
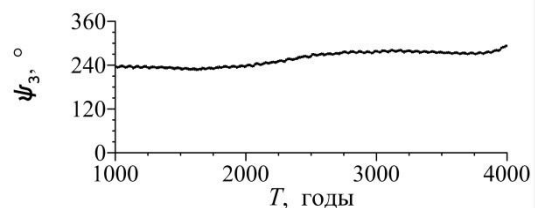
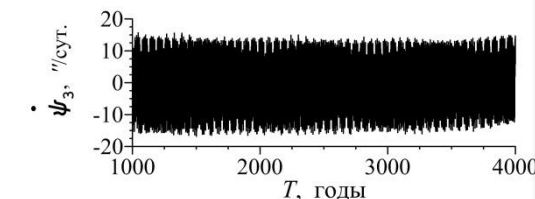
$$\dot{\psi}_8 = (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{Jup}) - 2\dot{\omega} - 2\dot{\omega}'_{Jup}$$

$$\dot{\psi}_{15} = (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{Jup}) - 2\dot{\omega}'_{Jup}$$

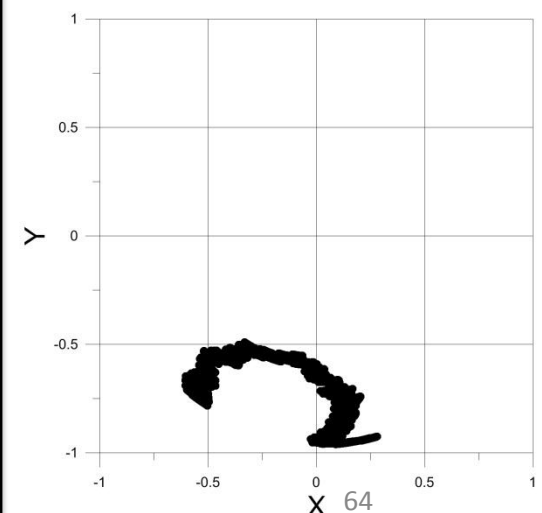
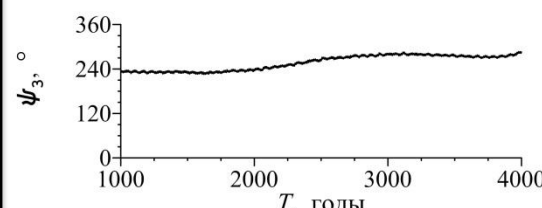
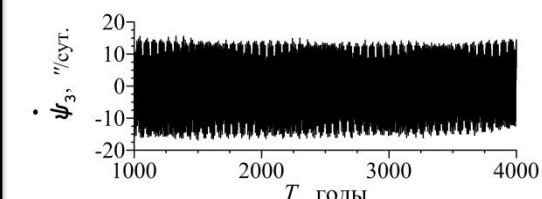
$$\dot{\psi}_{16} = (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{Jup}) + 2\dot{\omega}'_{Jup}$$



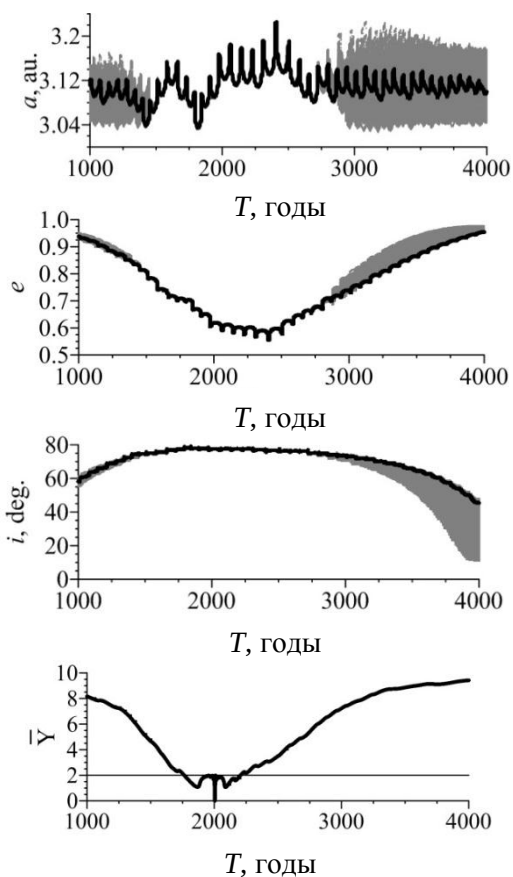
Вершина
дов. области



Точка из области



Эволюция большой
полуоси a , эксцентриситета
 e , наклонения i , и
параметра MEGNO ($Y(t)$)
для объекта 2003 EH1



Эволюция (а) - резонансных соотношений,
(б) - соответствующих им критических аргументов,
(в) - фазовый портрет в плоскости $x = e \cos \psi$, $y = e \sin \psi$.

$$\dot{\psi}_1 = (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{Jup}) + \dot{\omega} - \dot{\omega}'_{Jup}$$

$$\dot{\psi}_2 = (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{Jup}) - \dot{\omega} + \dot{\omega}'_{Jup}$$

$$\dot{\psi}_6 = (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{Jup}) - \dot{\omega} - \dot{\omega}'_{Jup}$$

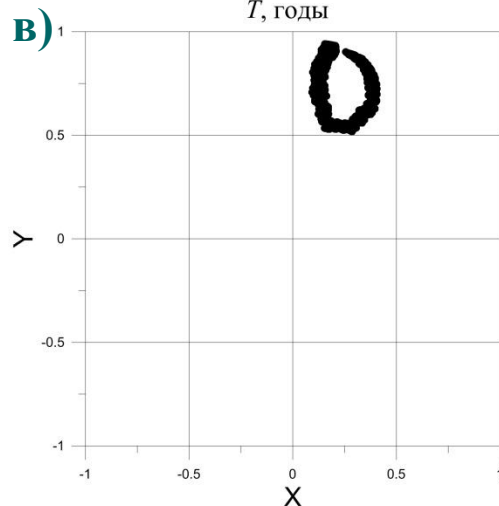
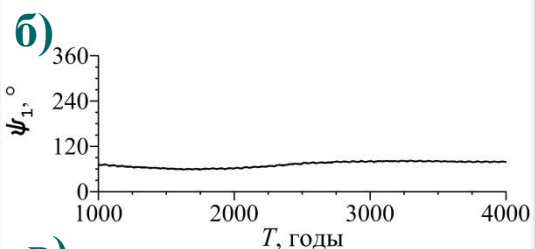
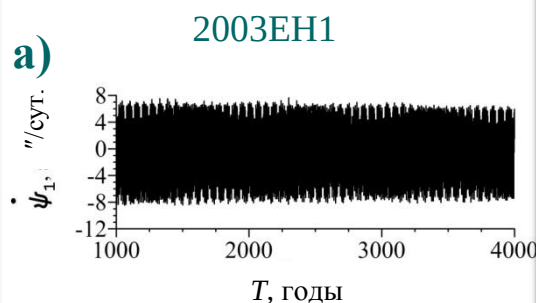
$$\dot{\psi}_{19} = \dot{\omega} + \dot{\omega}'_{Jup}$$

$$\dot{\psi}_7 = (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{Jup}) + 2\dot{\omega} + 2\dot{\omega}'_{Jup}$$

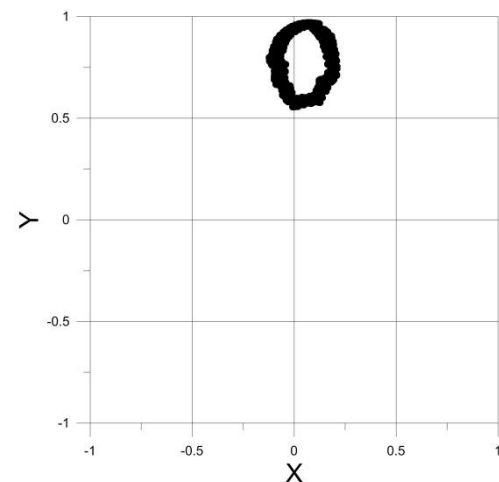
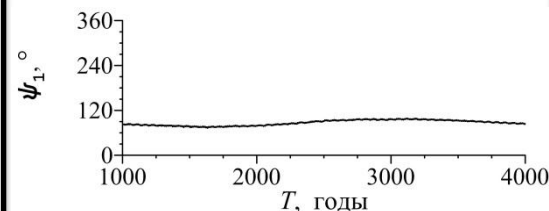
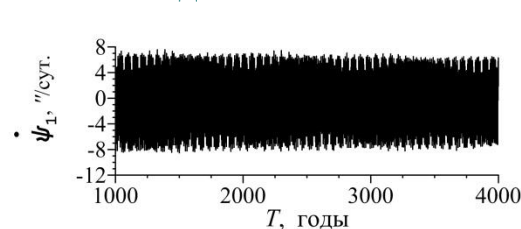
$$\dot{\psi}_{13} = (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{Jup}) + \dot{\omega}'_{Jup}$$

$$\dot{\psi}_{14} = (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{Jup}) - \dot{\omega}'_{Jup}$$

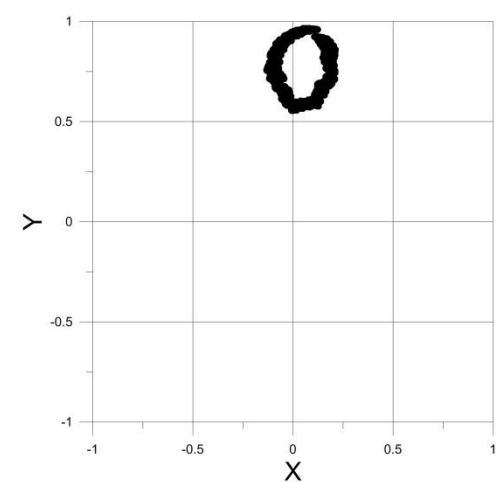
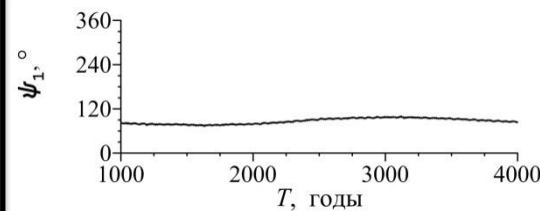
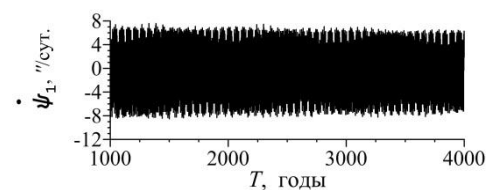
$$\dot{\psi}_{18} = \dot{\omega} - \dot{\omega}'_{Jup}$$



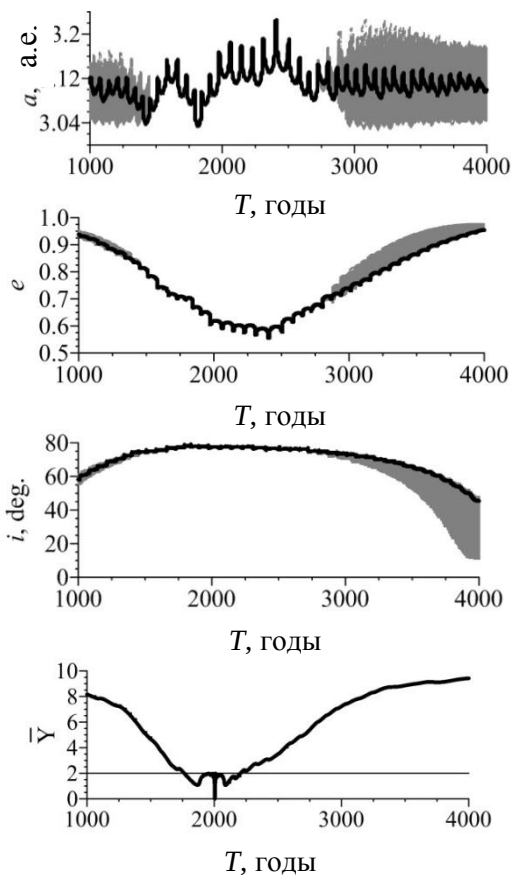
Вершина
дов. области



Точка из области



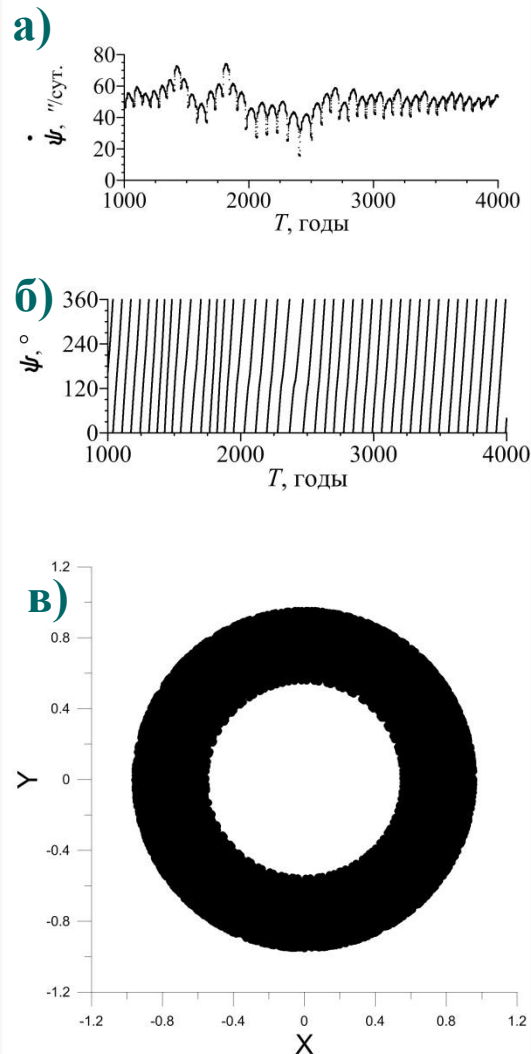
Эволюция большой
полуоси a , эксцентриситета
 e , наклона i , и
параметра MEGNO ($Y(t)$)
для объекта 2003 EH1



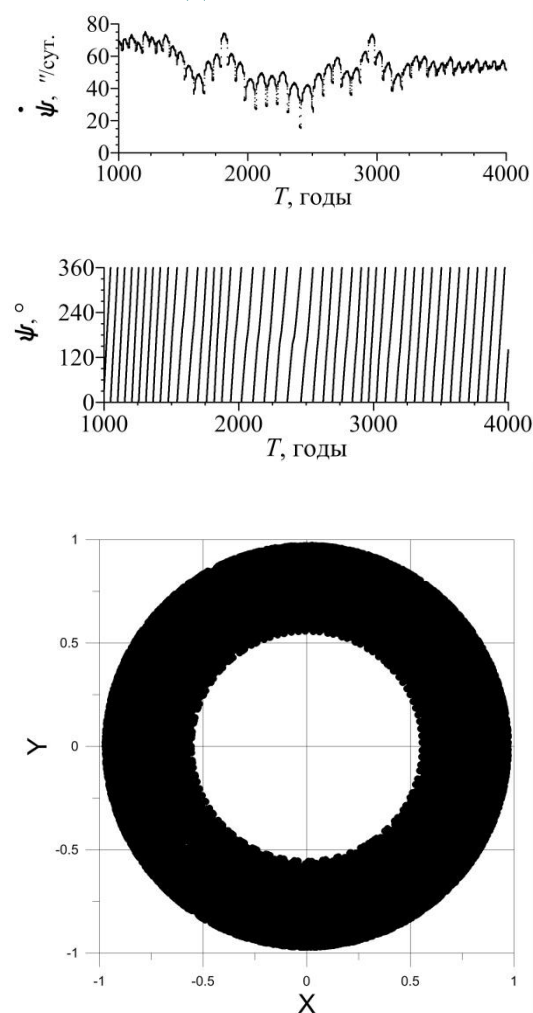
Эволюция (а) - резонансных соотношений,
(б) - соответствующих им критических аргументов,
(в) - фазовый портрет в плоскости $x = e \cos \psi$, $y = e \sin \psi$.

Астероид, не захвачен в резонанс 2/1 с Юпитером, но движется в его окрестности

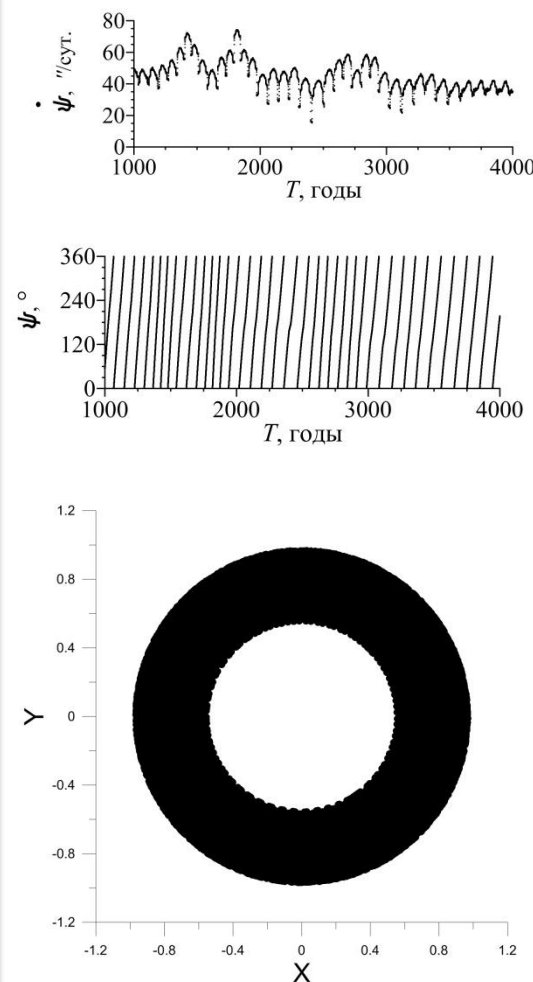
2003EH1



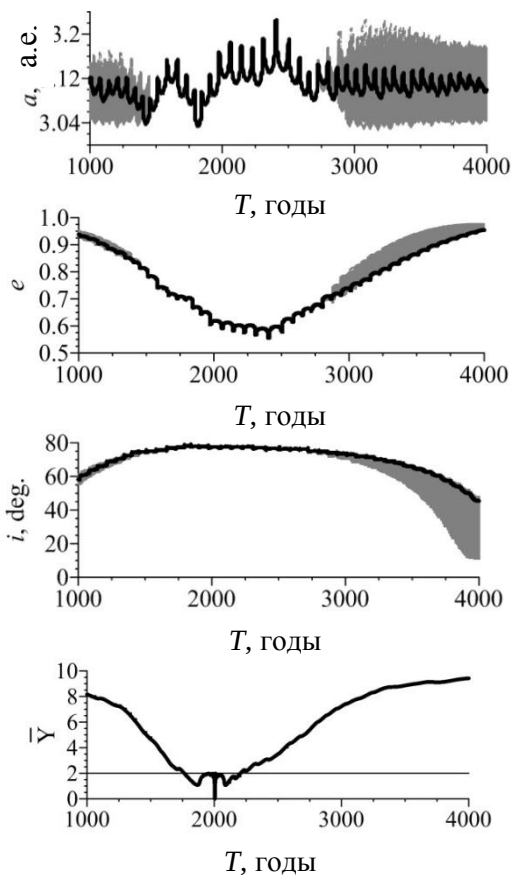
Вершина
дов. области



Точка из области



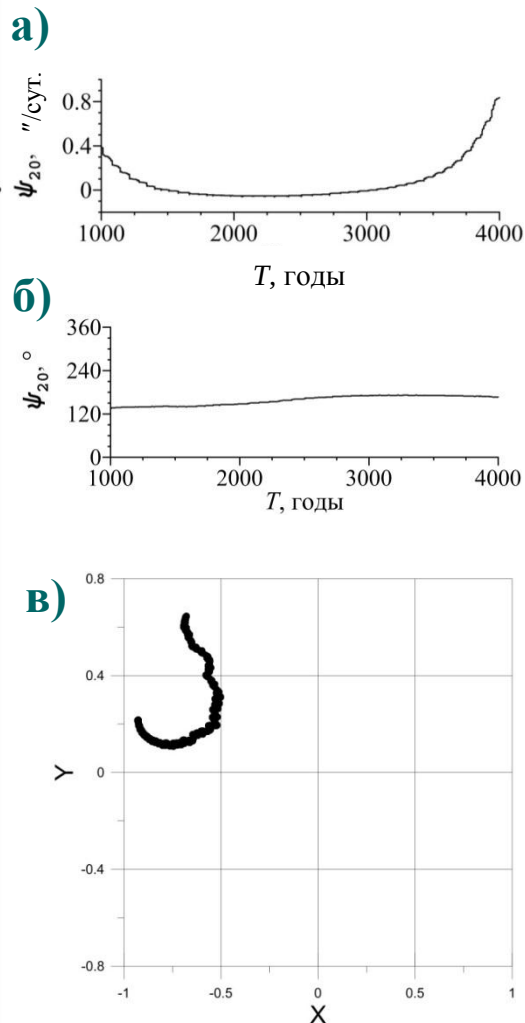
Эволюция большой
полуоси a , эксцентриситета
 e , наклона i , и
параметра MEGNO ($Y(t)$)
для объекта 2003 EH1



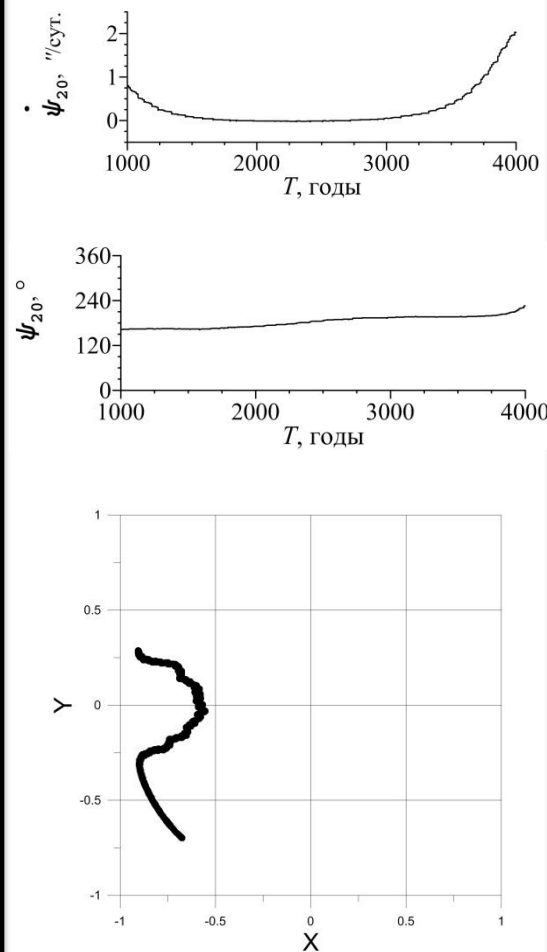
Эволюция (а) - резонансных соотношений,
(б) - соответствующих им критических аргументов,
(в) - фазовый портрет в плоскости $x = e \cos \psi_{20}$, $y = e \sin \psi_{20}$.

$$\dot{\psi}_{20} = \dot{\omega}$$

2003 EH1



Вершина
дов. области



Точка из области

