

Орбитальная эволюция молодых пар астероидов главного пояса, сближающихся с планетами, в окрестности резонансов

Э.Д. Кузнецов¹, М.А. Васильева¹, А.Е. Розаев², Е. Плавалова³

¹Уральский федеральный университет, пр. Ленина, 51, Екатеринбург, 620000, Россия, eduard.kuznetsov@urfu.ru, vasilyeva.maria@urfu.ru

²Ярославский государственный университет, ул. Советская, 14, Ярославль, 150000, Россия, hegem@mail.ru

³Mathematical Institute of the Slovak Academy of Sciences, Stefanikova 848/49, 81473, Bratislava, Slovakia, plavalova@komplet.sk

Введение

- Динамическая эволюция астероидов в окрестности резонансов может привести к переходу астероидов главного пояса в околоземные астероиды.
- Картина значительно усложняется, если учесть эволюцию пар астероидов на близких орбитах.
- Молодые пары астероидов во внутренней области главного пояса, помимо резонансов, могут испытывать сближения с Марсом, что может ускорить переход астероидов в группу астероидов, сближающихся с Землей.
- Известен ряд примеров резонансных взаимодействий молодых семейств и пар астероидов.
- Прежде всего, это семейство Datura в резонансе 9:16 с Марсом (Nesvorny et al. 2006).
- Pravec et al. (2019) отмечают, что хаотическое поведение орбит пары (49791) 1999 XF31 и (436459) 2011 CL97 может быть объяснено резонансом средних движений 15:8 с Марсом (15–8M).
- Duddy et al. (2012) указали, что пара (7343) Ockeghem и (154634) 2003 XX38 находится в трехтельном резонансе 2–1J–1M с Юпитером и Марсом.
- Мы приводим несколько новых примеров резонансов пар астероидов, которые могут иметь тесные сближения с Марсом.

Методика

- Уравнения возмущенного движения численно интегрируются в прошлое на интервале времени 0.8 млн лет с помощью интегратора Mercury (Chambers 1999) и на интервале 1 млн, используя программное обеспечение Orbit9 (Orbfit Consortium 2011).
- Для изучения взаимодействия рассматриваемой пары с резонансом и определения положения центра резонансной зоны используется метод, описанный в (Rosaev et al. 2020).
- Для каждого астероида рассматривалось три варианта эволюции: без учета эффекта Ярковского, с положительными и отрицательными значениями ускорения A_2 или скорости дрейфа da/dt .
- Использовались значения модулей негравитационного ускорения $|A_2| = 1 \cdot 10^{-13}$ а.е. сут.⁻² и скорости дрейфа большой полуоси $|da/dt| = 5 \cdot 10^{-4}$ а.е. (млн лет)⁻¹.

Результаты

- Среди пар астероидов, рассматриваемых в (Pravec et al. 2019), были найдены четыре пары, которые наряду с резонансами средних движений испытывают тесные сближения с Марсом:
 - (9068) 1993 OD – (455327) 2002 OP28,
 - (88666) 2001 RP79 – (501710) 2014 UY23,
 - (313701) 2003 UN3 – (531260) 2012 KL9,
 - (348452) 2005 RU20 – (418312) 2008 FF88.
- Сближения с Марсом оказывают наиболее сильное влияние на орбитальную эволюцию пар (9068) 1993 OD – (455327) 2002 OP28 и (88666) 2001 RP79 – (501710) 2014 UY23 (рис. 1), движущихся в окрестности трехтельного резонанса 10–75–3J с Сатурном и Юпитером (рис. 2–5).
- Сближения с Марсом приводят к резким изменениям больших полуосей орбит астероидов, что существенно затрудняет оценку возраста пар (рис. 1).
- Пара (88666) 2001 RP79 – (501710) 2014 UY23 испытывает первое тесное сближение с Марсом через 37 039 лет от начала моделирования в прошлое.
- Для пары (9068) 1993 OD – (455327) 2002 OP28 первое тесное сближение с Марсом происходит через 47 лет после начала интегрирования в прошлое.
- В табл. 1 приводятся сведения о наиболее тесных сближениях с Марсом, время t отсчитывается от эпохи MJD 58800 (13 ноября 2019).
- Астероиды пары (88666) 2001 RP79 – (501710) 2014 UY23 испытывают тесные сближения с Марсом, когда они находятся в зоне резонанса (от -0.5 до -0.3 млн лет), что приводит к увеличению времени прохождения через резонанс (см. рис. 5).

Таблица 1. Самые тесные сближения пар астероидов с Марсом

da/dt , а.е. (млн лет) ⁻¹	Пара астероидов	t , годы	Δr , а.е.	Пара астероидов	t , годы	Δr , а.е.
0	(88666) 2001 RP79	–49 696	0.15	(9068) 1993 OD	–324 240	0.035
0	(501710) 2014 UY23	–37 500	0.20	(455327) 2002 OP28	–852 756	0.059
$5 \cdot 10^{-4}$	(88666) 2001 RP79	–40 543	0.13	(9068) 1993 OD	–282 992	0.050
$5 \cdot 10^{-4}$	(501710) 2014 UY23	–38 638	0.12	(455327) 2002 OP28	–77 941	0.028
$-5 \cdot 10^{-4}$	(88666) 2001 RP79	–38 339	0.036	(9068) 1993 OD	–497 234	0.084
$-5 \cdot 10^{-4}$	(501710) 2014 UY23	–47 287	0.20	(455327) 2002 OP28	–808 215	0.050
0	(313701) 2003 UN3	–151 683	0.15	(348452) 2005 RU20	–215 352	0.13
0	(531260) 2012 KL9	–983 293	0.093	(418312) 2008 FF88	–267 875	0.12
$5 \cdot 10^{-4}$	(313701) 2003 UN3	–152 624	0.12	(348452) 2005 RU20	–231 724	0.19
$5 \cdot 10^{-4}$	(531260) 2012 KL9	–150 995	0.11	(418312) 2008 FF88	–130 591	0.18
$-5 \cdot 10^{-4}$	(313701) 2003 UN3	–640 784	0.12	(348452) 2005 RU20	–216 238	0.17
$-5 \cdot 10^{-4}$	(531260) 2012 KL9	–152 432	0.23	(418312) 2008 FF88	–266 908	0.19

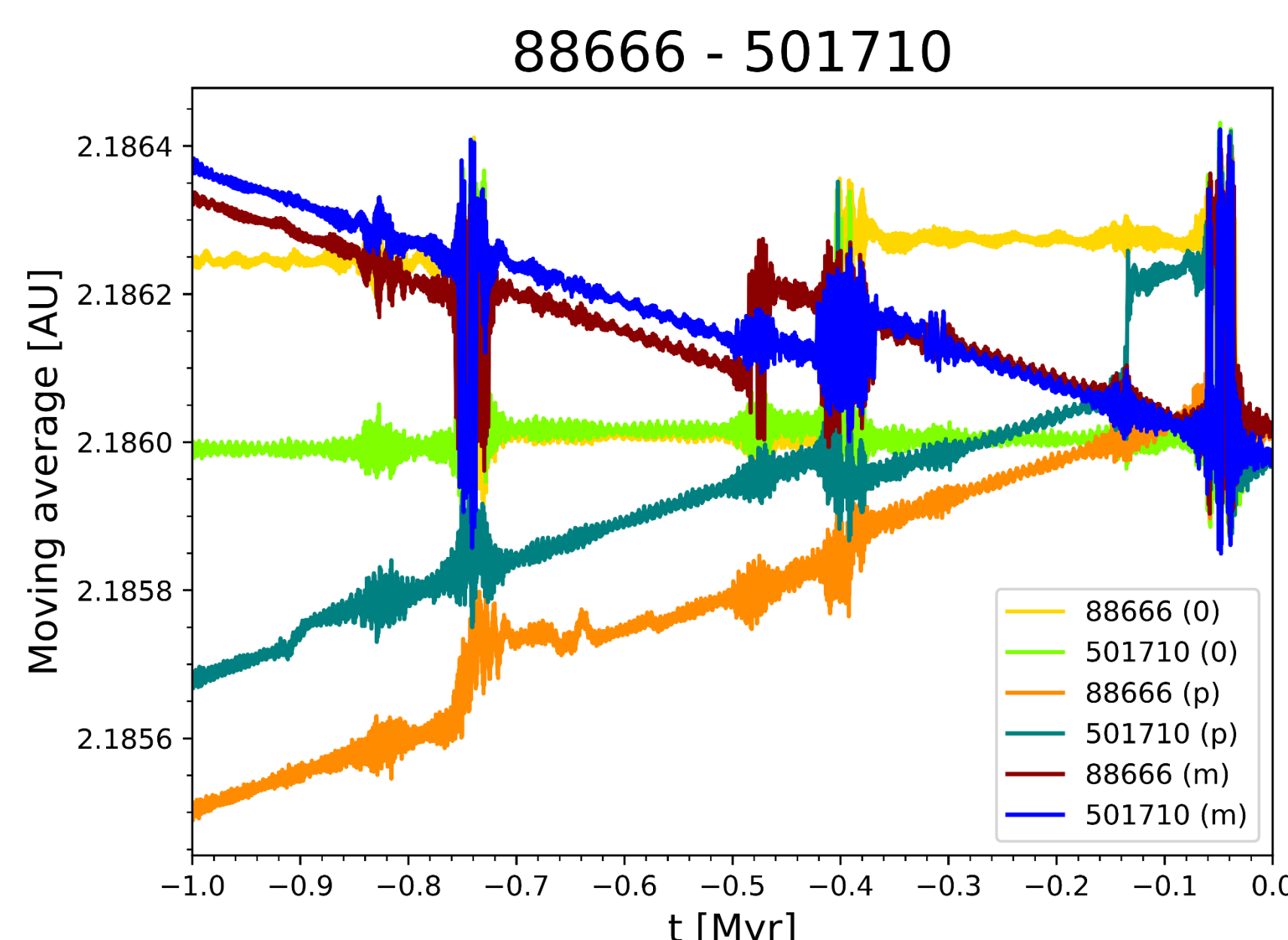


Рис. 1. Эволюция больших полуосей орбит астероидов пары (88666) 2001 RP79 – (501710) 2014 UY23 (без учета эффекта Ярковского (0), с положительной (p) и отрицательной (m) скоростью дрейфа большой полуоси)

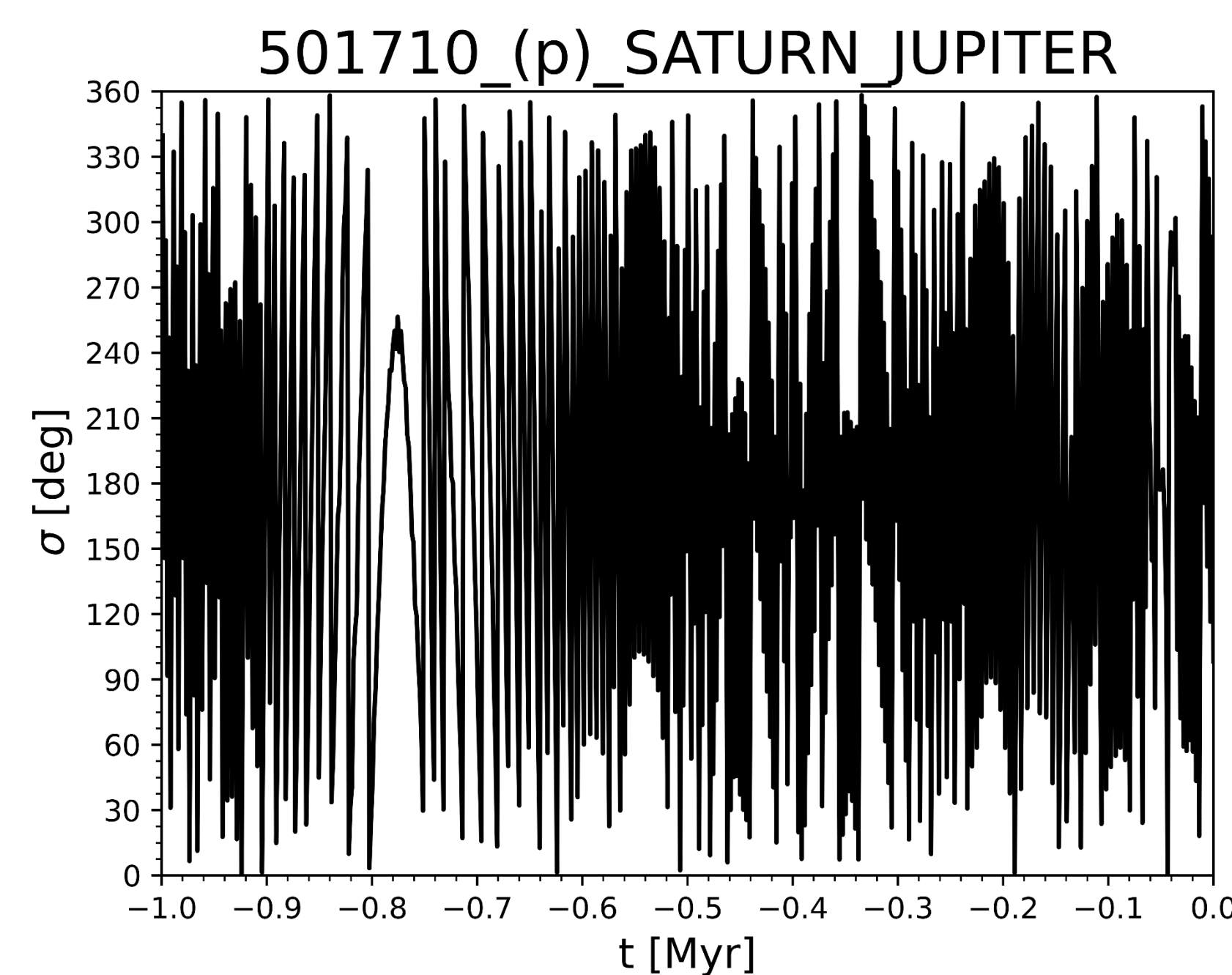


Рис. 4. Эволюция критического аргумента σ для астероида (501710) 2014 UY23 (скорость дрейфа большой полуоси положительная)

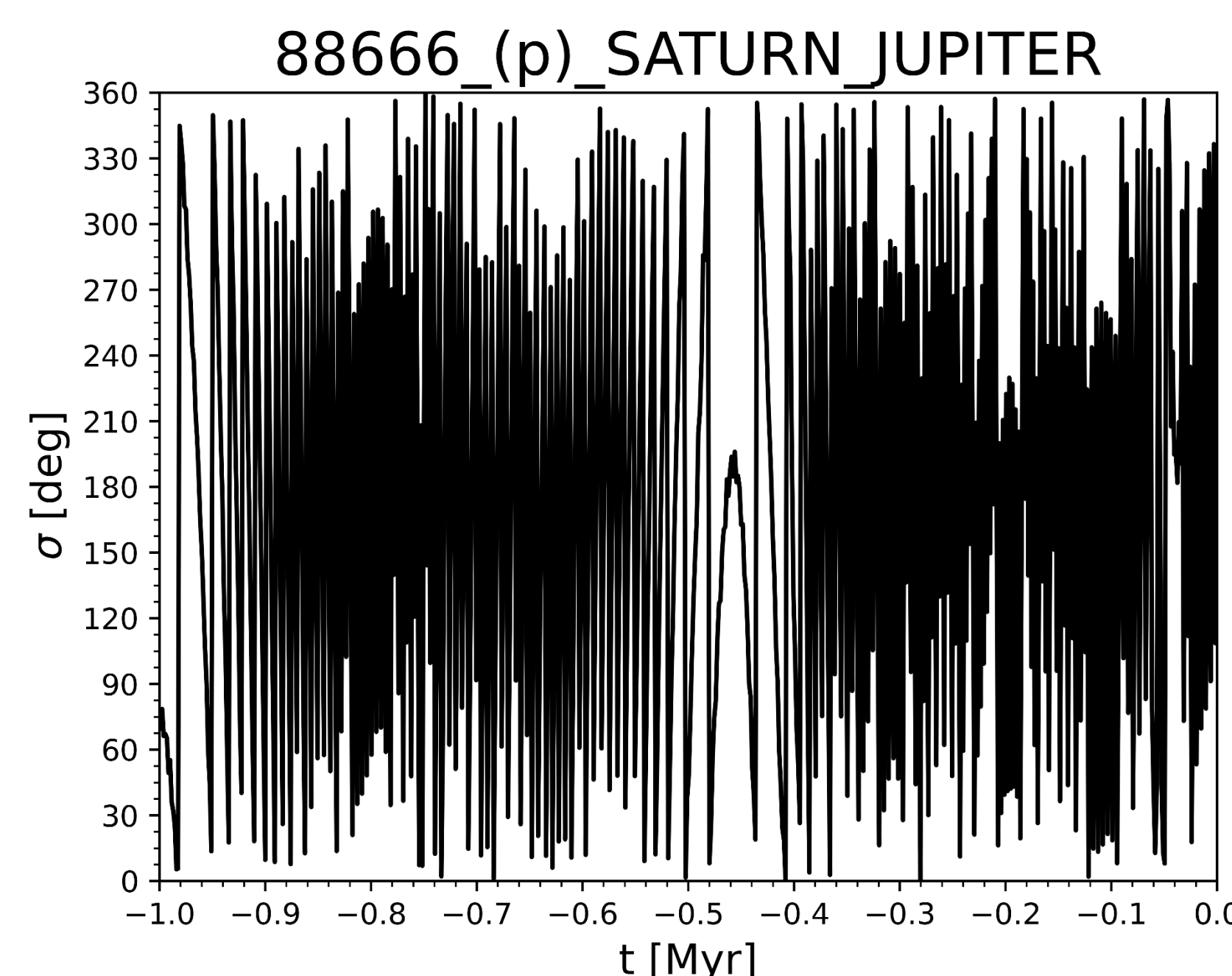


Рис. 2. Эволюция критического аргумента σ для астероида (88666) 2001 RP79 (скорость дрейфа большой полуоси положительная)

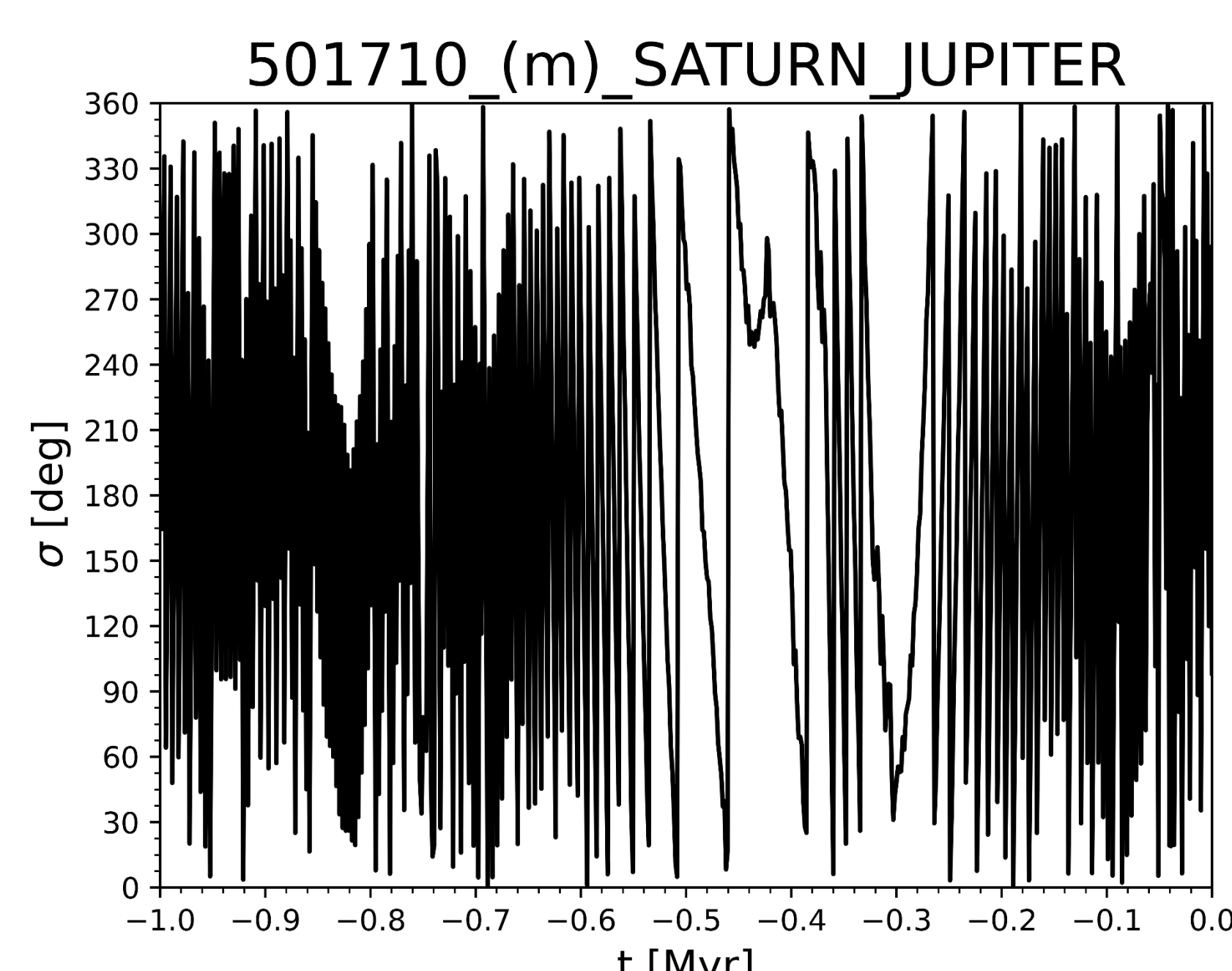


Рис. 5. Эволюция критического аргумента σ для астероида (501710) 2014 UY23 (скорость дрейфа большой полуоси отрицательная)

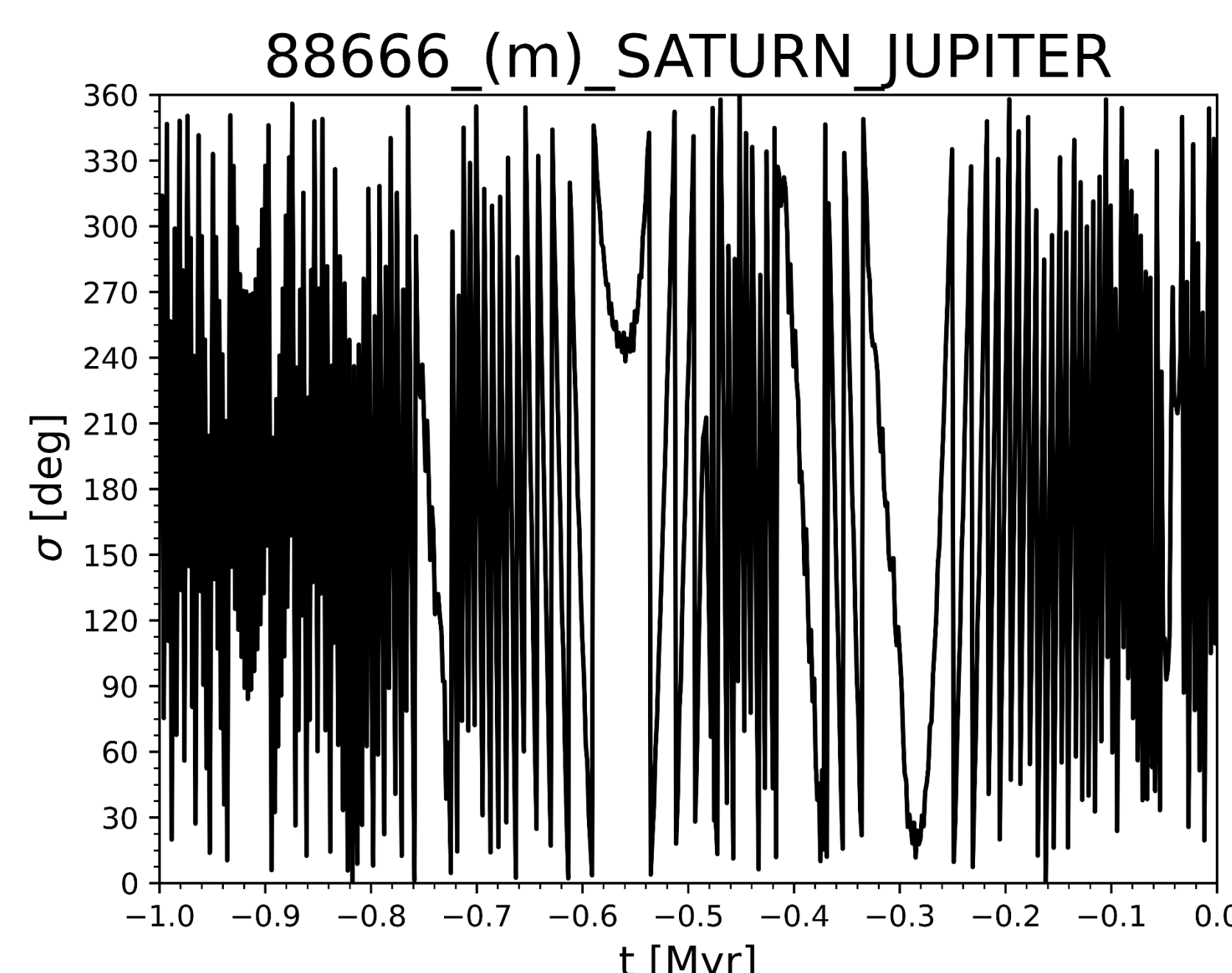


Рис. 3. Эволюция критического аргумента σ для астероида (88666) 2001 RP79 (скорость дрейфа большой полуоси отрицательная)

Благодарности

Работа поддержана госзаказом Министерства науки и высшего образования РФ FEUZ-2020-0030 (ЭДК) и FEUZ-2020-0038 (МАН).

Список литературы

- Nesvorny D. et al. (2006) *Science* 312:1490.
- Pravec P. et al. (2019) *Icarus* 333:429–463.
- Duddy S. R. et al. (2012) *A&A* 539:A36.
- Chambers J. E. (1999) *MNRAS* 304:793–799.
- Orbfit Consortium (2011) *Astrophysics Source Code Library* arXiv:1106.015.
- Rosaev A. et al. (2020) *Res. Notes AAS* 4:239.