



Исследование влияния групп Троянцев Юпитера на движение планет и динамические оценки их массы

Питьева Е. В.¹, Питьев Н.П.^{1,2}

¹ Институт прикладной астрономии РАН, 191187, Санкт-Петербург,
наб. Кутузова, 10. E-mail: evp@iaaras.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет, 198504 Russia, Санкт-Петербург,
пр. Университетский, 28. E-mail: ai@astro.spbu.ru



Троянскими астероидами называют астероиды,

находящихся в окрестностях точек Лагранжа L_4 и L_5 в орбитальном резонансе 1:1 с планетами. Сами точки L_4 и L_5 для круговой орбиты планеты находятся в плоскости орбитального движения планеты, опережая ее (L_4) и отставая от нее (L_5) на 60° .

В настоящее время **ТРОЯНЦЫ** найдены у многих планет Солнечной системы.

Для **Земли** первый троянский астероид был обнаружен в 2010 году — 2010 ТК₇. Это небольшой объект, его диаметр — около 300 метров. Он обращается вокруг точки L_4 .

Троянские астероиды найдены для **Марса** (7): 1 около L_4 , 6 в окрестности L_5 .

Об открытии у **Урана** первого троянского астероида было объявлено в 2013 г. — 2011 QF₉₉ — небольшой объект с диаметром 60 км, обращается вокруг точки L_4 .

Около **Нептуна** найдено 17 троянцев: 13 в окрестности L_4 и 4 около L_5 .



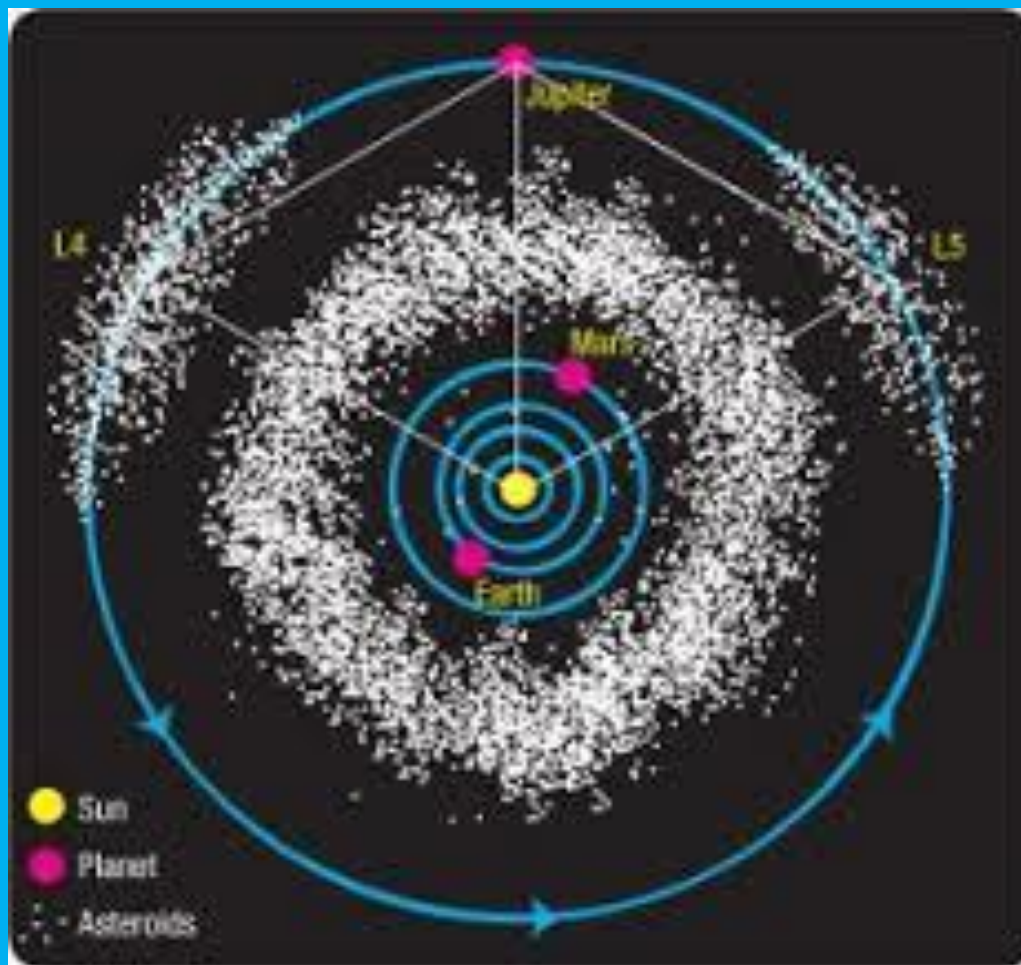
Наибольшее число троянцев найдено у Юпитера и именно у него был открыт первый троянец в 1906 году германским астрономом Максом Вольфом в окрестностях L4, получивший затем обозначение (588) Ахиллес.

Облака троянцев содержат разные объекты. Большинство из них являются астероидами D-типа, остальные классифицированы как P- и C-типы астероиды. Плотность различна: от 0.8 г/см^3 (Патрокл) до 2.48 г/см^3 (Гектор).

Количество небольших астероидов в облаках юпитерианских троянцев велико. Ожидается, что в следующем десятилетии в связи с запуском 8.4 м **Большого синоптического обзорного телескопа (LSST)**, будет найдено приблизительно **300 тысяч** троянцев между 16^{m} и $24^{\text{m}}.5$ в полосе «r». Начало пробных наблюдений предполагается в 2020-2021 годах. Полный ввод в действие телескопа **LSST** планируется в 2022 году.



Троянцы у Юпитера: «Греки» (L4) и «Троянцы» (L5)



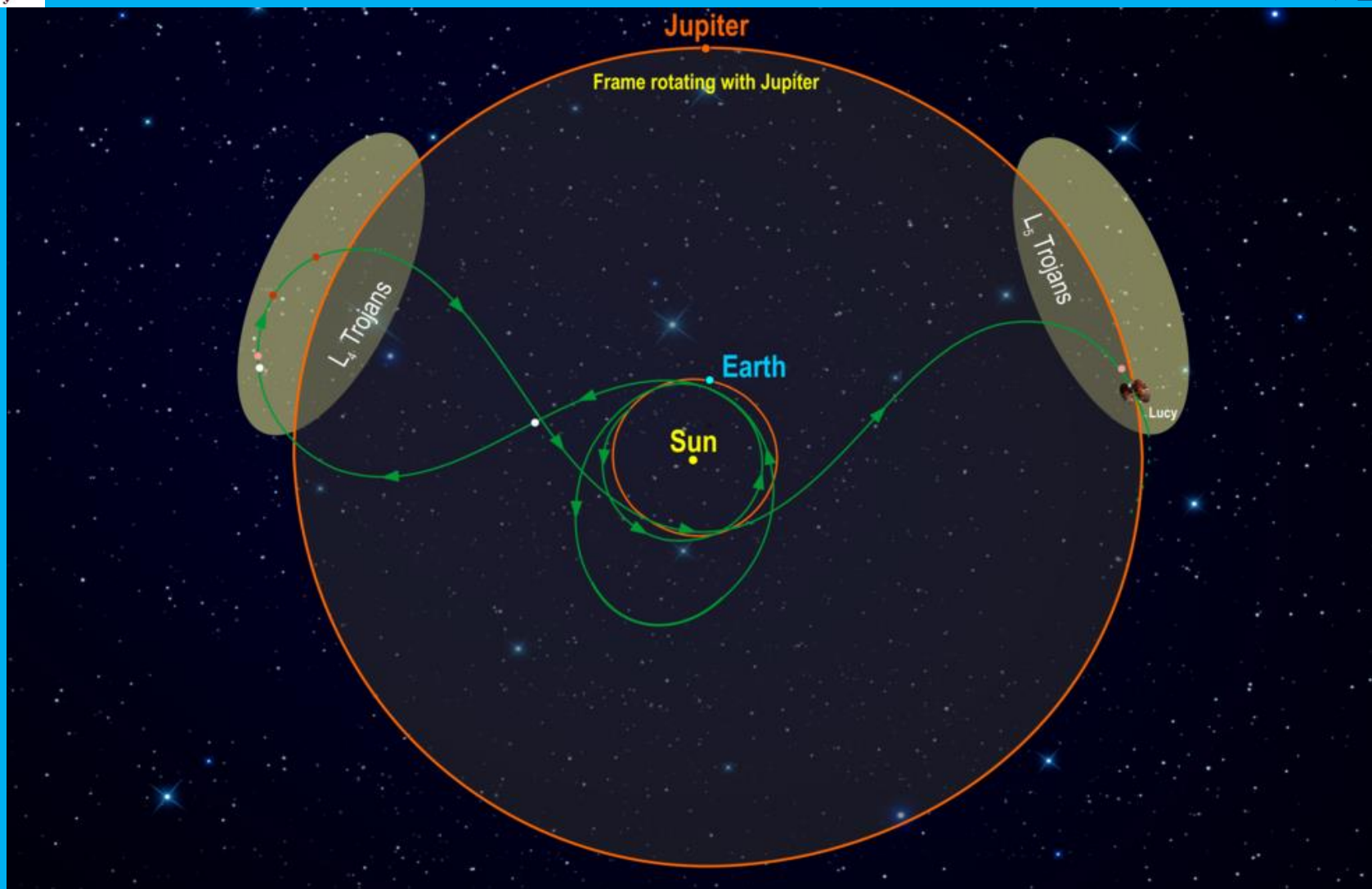


Актуальность темы троянцев Юпитера связана также с планируемой миссией НАСА.

НАСА готовится к исследованию троянцев с помощью космического аппарата «**Lucy**», который планируется запустить в октябре 2021 г. Пролёт через главный пояс астероидов намечен на 2025 г.

Аппарат прибудет в окрестность облака **L4** в 2027 г. и начнет последовательно исследование 4 троянцев (**2027-2028**). Затем вернется к Земле для гравитационного маневра в сторону **L5**. В окрестности **L5** в **2033** г. «**Люси**» посетит двойной троянский астероид 617 **Patroclus-Menoetius**.

Миссию планируется вооружить новыми версиями исследовательских инструментов, использовавшихся в аппарате «**Новые горизонты**» при исследовании **Плутона**.





В настоящее время свыше 6000 троянских объектов Юпитера зарегистрировано в Minor Planet Center : почти 4000 астероидов около L_4 и более 2000 астероидов около L_5 . Они образуют компактные группы, включают кроме открытых еще, как полагают, сотни тысяч тел с диаметрами больше 1 км. Суммарное гравитационное притяжение этих групп систематически влияет на движение планет, особенно на движение сравнительно близкого Марса.

Наша работа носила отчасти экспериментальный, пробный характер. Уровень точности в настоящее время для наблюдательных данных и эфемерид Марса составляет около двух метров. Если суммарное влияние каждой группы астероидов по отдельности окажется больше, то можно из наблюдений получить массы групп «Троянцев» (L_4) и «Греков» (L_5). И это была бы первая динамическая оценка суммарных масс астероидов в районах L_4 и L_5 .

Этот же результат указывал бы **на необходимость** для достигнутой точности современных планетных эфемерид и наблюдательных данных **включения гравитационного влияния со стороны троянцев Юпитера в динамическую модель Солнечной системы** .

В противном случае учет притяжения со стороны троянцев Юпитера был бы еще преждевременным и меньше достигнутого уровня точности.

Существенным указанием на возможность нахождения суммарных масс компактных групп троянцев Юпитера L_4 и L_5 оказалась достигнутая нами точность определения массы Главного пояса астероидов:

$$(4.008 \pm 0.029) \cdot 10^{-4} M_{\text{Earth}} \quad (3\sigma)$$

[ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2018, том 44, № 8–9, с. 604–617].

Оценка общей массы групп троянцев в работе Виноградовой, Чернетенко (2015) получилась

$$m_{\text{Trojan}} = (0.30 \pm 0.19) \cdot 10^{-10} M_{\text{Sun}} = (0.10 \pm 0.06) \cdot 10^{-4} M_{\text{earth}}$$

и эта величина превышала погрешность наших результатов для Главного пояса. Поэтому влияние двух компактных групп троянцев следовало уточнить и исследовать, и, в первую очередь на движение Марса.



Моделирование гравитационного притяжения Троянцев Юпитера

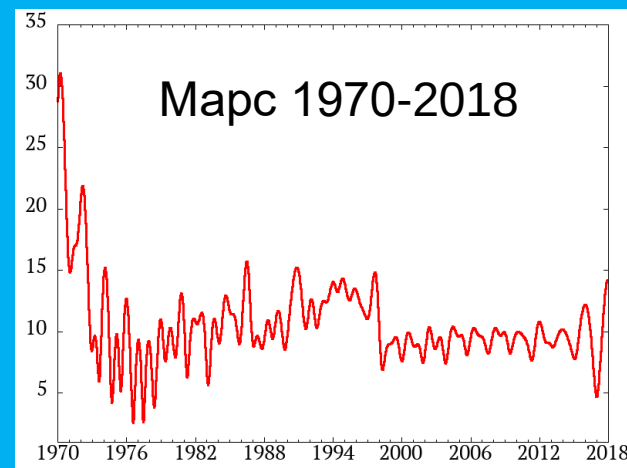
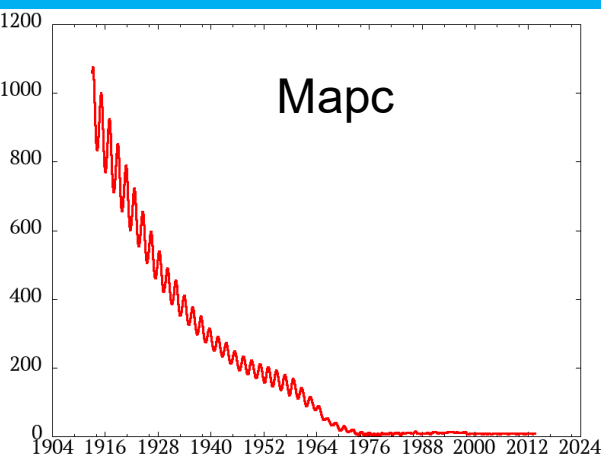
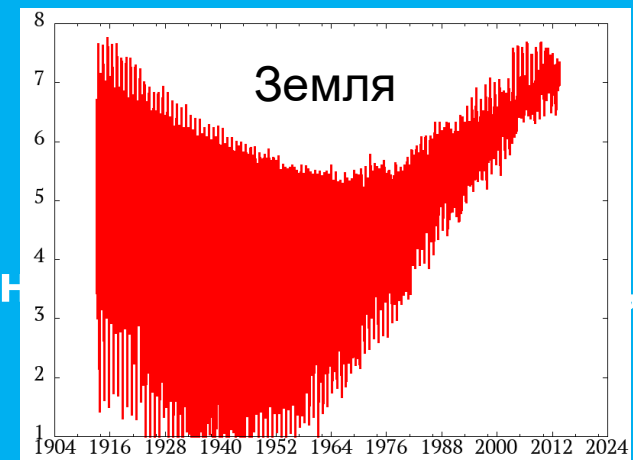
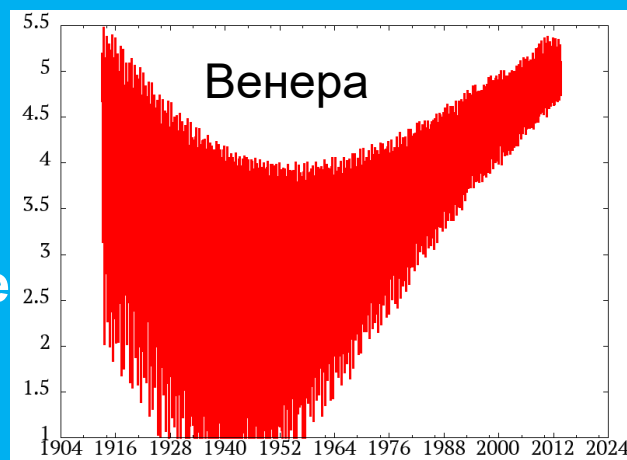
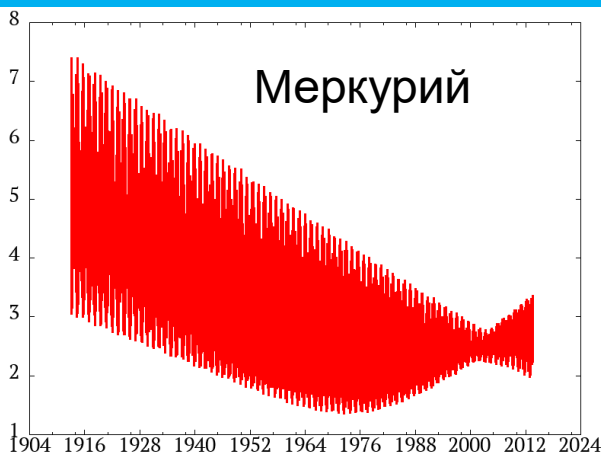
Для моделирования суммарного гравитационного влияния групп в окрестности L4 и L5 были добавлены две материальные точки, вращающиеся по круговой орбите с радиусом равным полуоси орбиты Юпитера. Плоскость круговой орбиты совпадала с орбитальной плоскостью орбиты Юпитера, материальные точки отстояли на 60° от Юпитера впереди (L4) и сзади (L5). Круговые скорости соответствовали прямому движению и равнялись средней орбитальной скорости Юпитера.

Массы групп троянцев L4 и L5 предполагались разными и находились из обработки наблюдений в итерационном процессе. Начальные массы в точках L4 и L5 были взяты из результатов статистических оценок (Виноградова, Чернетенко, 2015) и равнялись соответственно:

$$m_{L4} = 0.19 \cdot 10^{-10} M_{\text{Sun}}; \quad m_{L5} = 0.11 \cdot 10^{-10} M_{\text{Sun}} .$$



Смещение планет за счет влияния Троянцев Юпитера, **в метрах**, 1913-2018





Работа выполнена на основе новой версии планетных эфемерид ИПА РАН EPM2017



Новая версия включает несколько модернизаций программного комплекса, усовершенствованную динамическую модель Солнечной системы и опирается на наблюдательные данные, охватывающие оптические, радиолокационные и радиотехнические с 1913 года по 2015 год.

Эфемериды	Описание
ЕРМ1987	- Взаимные возмущения от планет, Солнца, Луны и 5 астероидов, наиболее сильно, возмущающих Марс и Землю; - Релятивистские возмущения Einstein-Infeld-Homann (Krasinsky et al., 1986, 1991, 1993) ;
ЕРМ 1998	возмущения других 296 астероидов, выбранных из-за их сильных возмущений Марса и Земли (Питьева, 1998);
ЕРМ2000	возмущения от сжатия Солнца J_2 (Питьева, 2001) ;
ЕРМ2004	возмущения от одномерного массивного кольца меньших астероидов (Krasinsky et al., 2002) Питьева, 2005) ;
ЕРМ2008	возмущения от 21 наибольших ТНО (Pitjeva, 2010);
ЕРМ2011	возмущения от массивного одномерного кольца ТНО TNO в плоскости эклиптики с $R=43$ au (Питьева , 2012);
ЕРМ2013/ ЕРМ2014	- возмущения от массивного двумерного кольца ТНО ($R_1= 2.06$ au, $R_{41}= 3.27$ au) (Питьева , 2013); - возмущения от 30 наибольших ТНО (Питьева ., 2013).



Эволюция эфемерид EPM с 2015 по 2018 гг.



Ephemerides	Description
EPM2015	- Новая версия (ERA-8) программного комплекса ERA (Ephemeris Research in Astronomy), основанная на the Racket платформе с астрономическими программами на C++ (Pavlov, Skripnichenko, 2015); - Новая версия орбитально-вращательного движения Луны, основанная на уравнениях DE430 (возмущения орбиты благодаря приливам от Земли, вращательная диссипация и жидкое ядро) (Pavlov et al., 2016).
EPM2017	- Включение релятивистских Lense-Thirring ускорений в модель (важно для MESSENGER); - улучшение релятивистского определения барицентра (производная релятивистского гравитационного параметра взято, как было сделано в работе (Fienga et al. 2008)); - длинная “Holocene” версия эфемерид, EPM2017H, покрывающая интервал более 13000 лет (10107 BC - AD 3036) (Cionco and Pavlov, 2018).
EPM2018	- Новая дискретная модель малых тел Главного пояса астероидов и пояса Койпера + динамические оценки их масс (Pitjeva and Pitjev, 2018, Питьева и Питьев, 2018)); - возмущения от Троянцев Юпитера с динамической оценкой их масс.



Observations for EPM2017



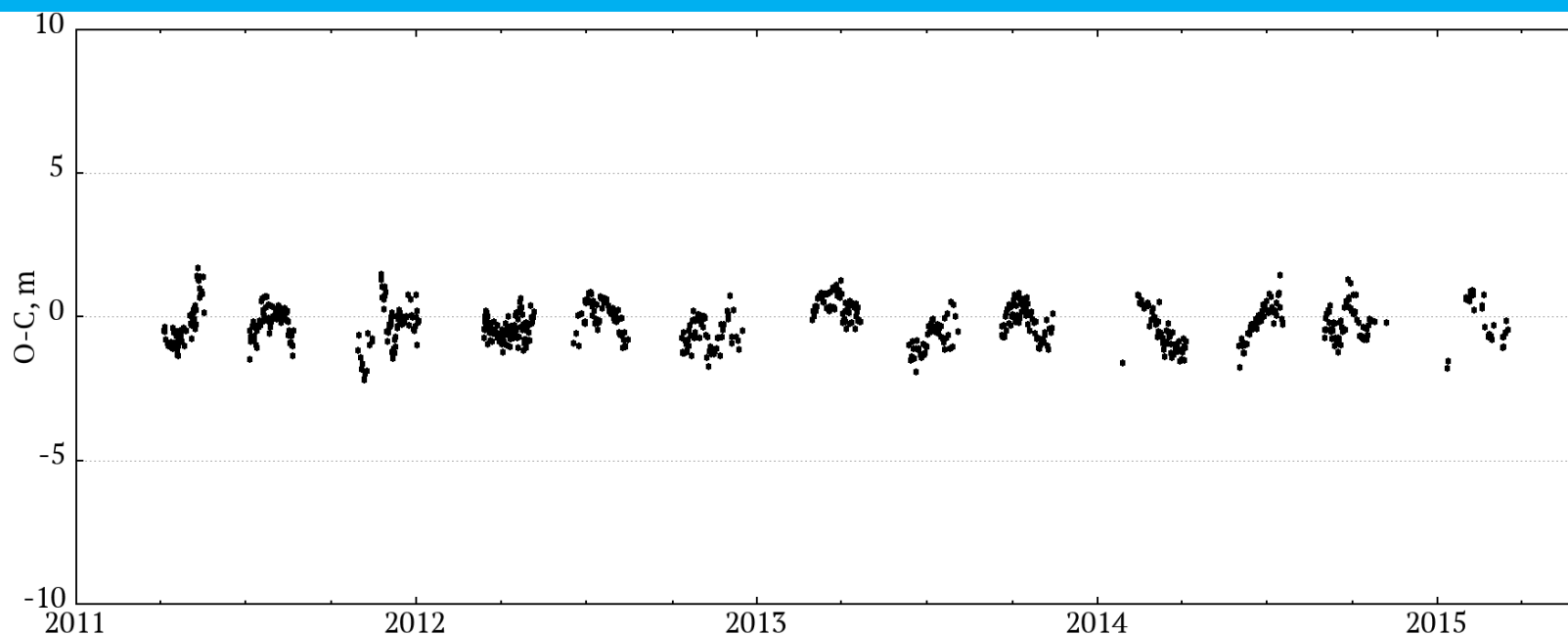
Планетная часть эфемерид EPM2017 была улучшена из около 800000 наблюдений планет и КА 2913 — 2017, от классических меридианных наблюдений до современных траекторных данных КА. Однако, данные КА на одном обороте около планет коррелируют между собой. Поэтому авторы (Folkner, Jacobson) объединили все наблюдения на одном обороте КА в нормальные маста.

Планеты	Радарные		Оптика	
	Интервал наблюдений	Число нормальных точек	Интервал наблюдений	Число наблюдений
Меркурий*	1964-2015	1570	— —	— —
Венера	1961-2013	3799	— —	— —
Марс	1965-2015	49245	— —	— —
Юпитер* + 4 спут.	1973-2017	59	1914-2013	14866
Сатурн* + 7 спут.	1979-2014	187	1913-2013	16455
Уран + 4 спут.	1986	3	1914-2013	12550
Нептун+ 1 спут.	1989	3	1913-2013	12404
Pluto	— —	— —	1914-2013	16674
<i>Total</i>	<i>1961-2017</i>	<i>54862</i>	<i>1913-2013</i>	<i>72929</i>

Пулково-2018 · 1–5 октября 2018 · Санкт-Петербург



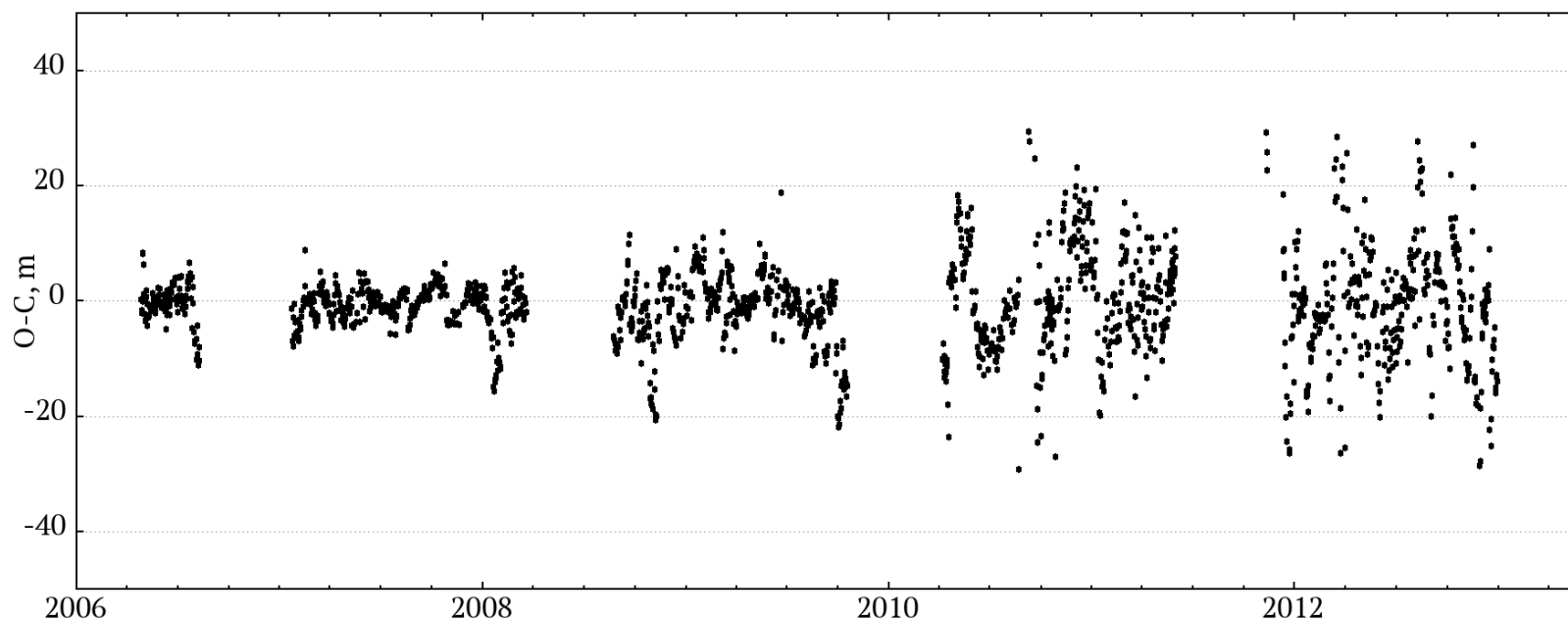
Spacecraft MESSENGER orbiting around Mercury 2011 – 2015



The residuals of one-way ranging for spacecraft MESSENGER computed using EPM2017,
the wrms $\sigma = 0.7$ m.



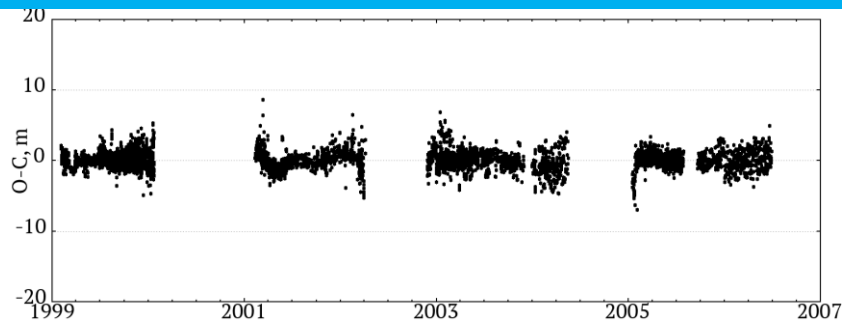
Spacecraft Venus Express orbiting around Venus 2006 – 2012



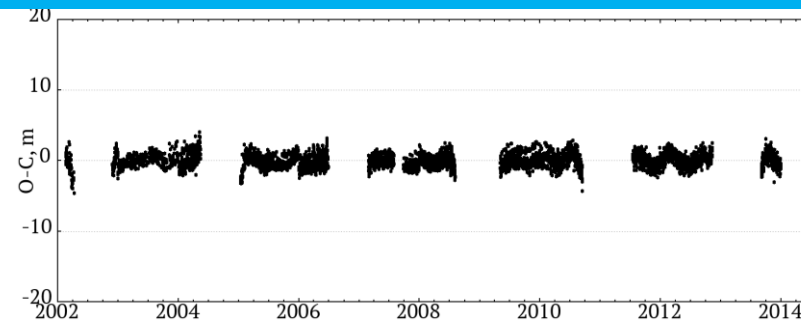
The residuals of one-way ranging for spacecraft Venus Express computed using EPM2017, the wrms $\sigma = 2.98$ m.



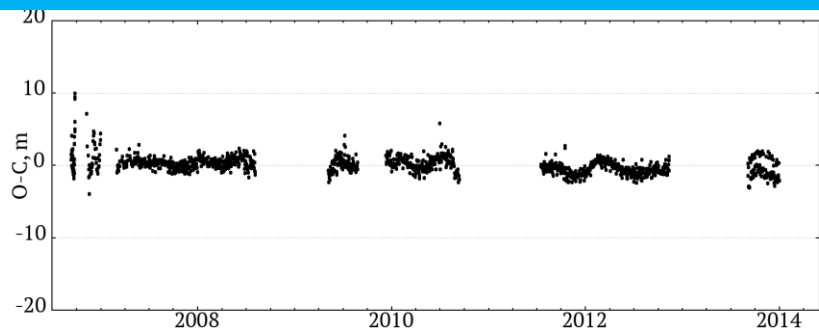
Martian Spacecraft 1999 – 2015



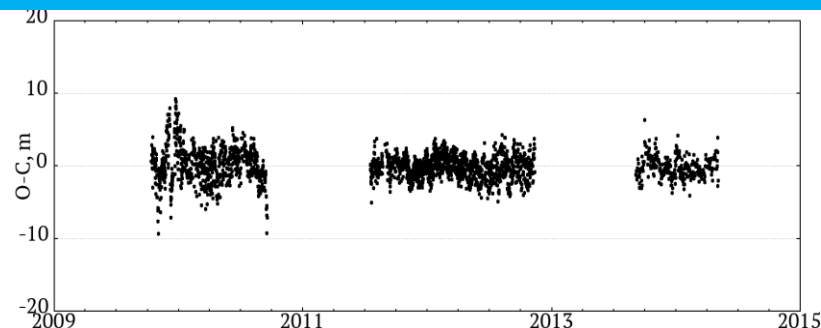
The residuals of one-way ranging for spacecraft Mars Global Surveyor computed using EPM2017, the **wrms $\sigma = 1.17$ m.**



The residuals of one-way ranging for spacecraft Odyssey computed using EPM2017, the **wrms $\sigma = 0.95$ m.**



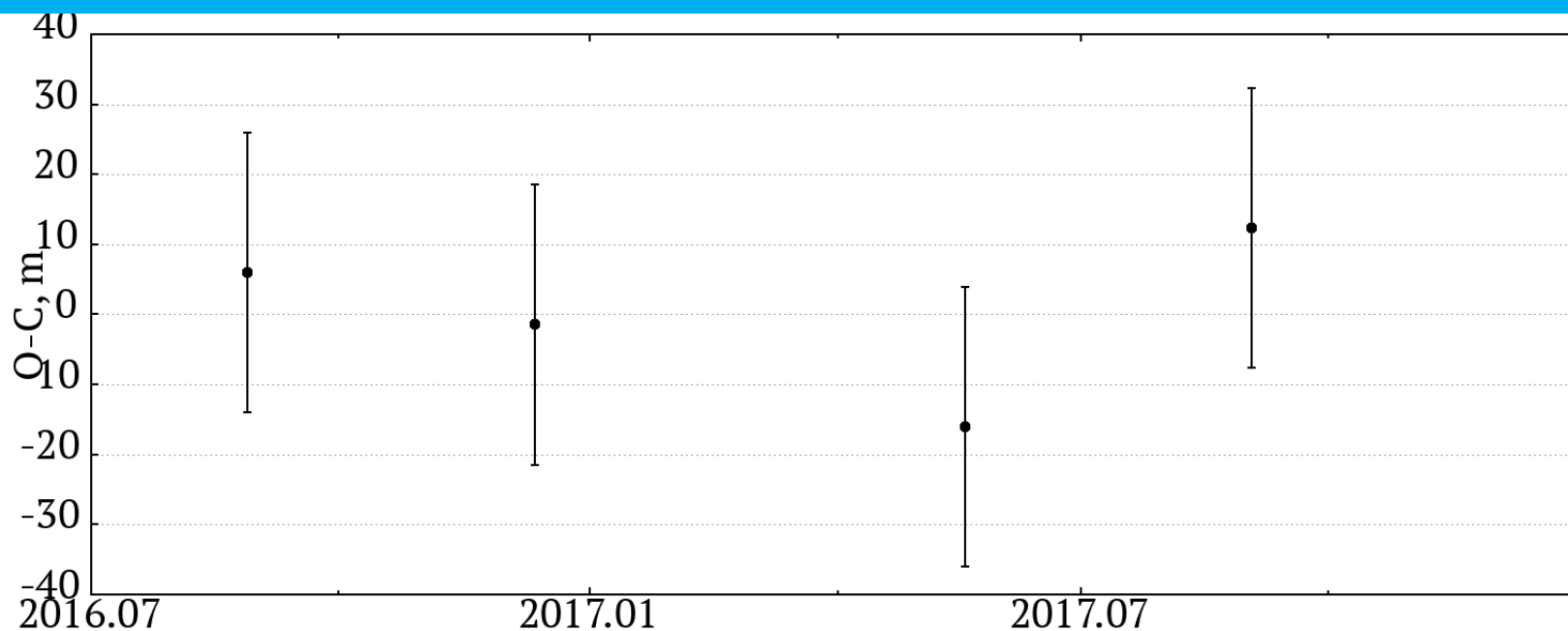
The residuals of one-way ranging for spacecraft Mars Reconnaissance Orbiter computed using EPM2017, the **wrms $\sigma = 0.96$ m.**



The residuals of one-way ranging for spacecraft Mars Express computed using EPM2017, the **wrms $\sigma = 1.5$ m.**



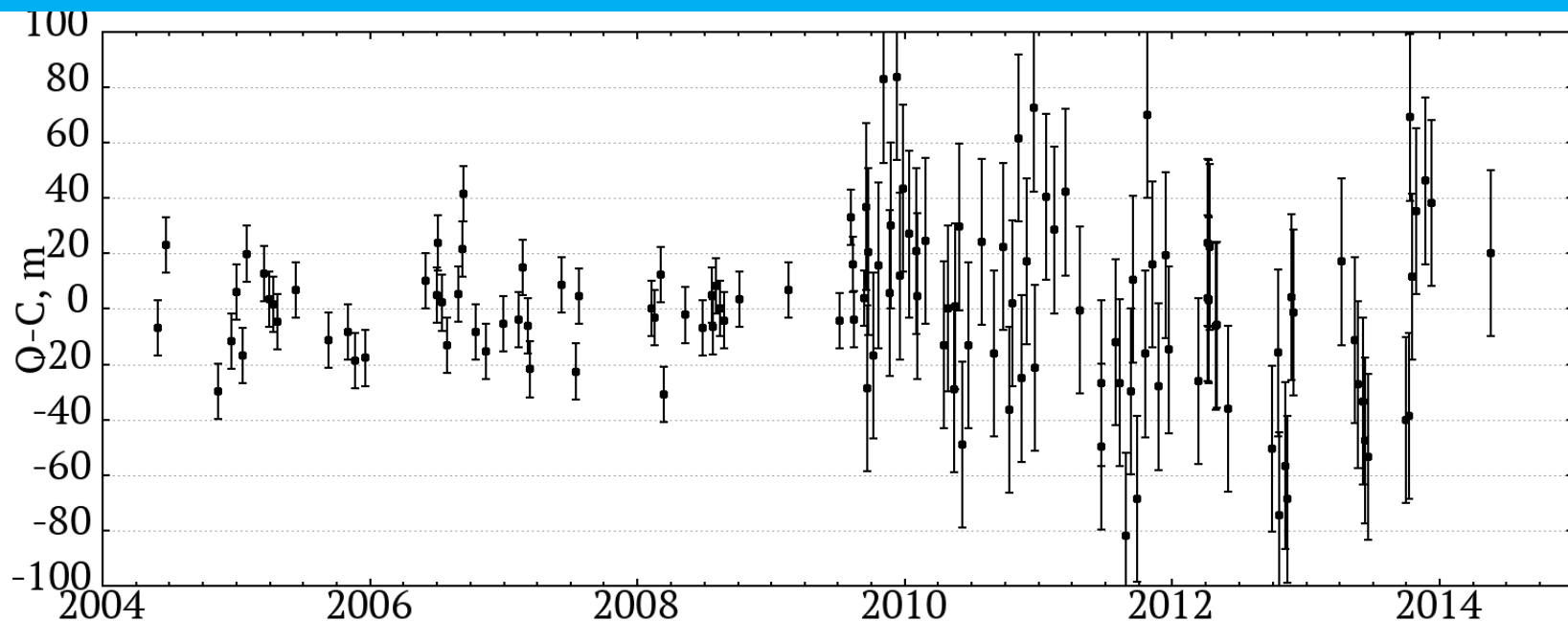
Spacecraft Juno orbiting around Jupiter 2016 – 2017



The residuals of one-way ranging for spacecraft Juno computed using EPM2017, the wrms $\sigma = 11.03$ m.



Spacecraft Cassini orbiting around Saturn 2004 – 2014



The residuals of one-way ranging for spacecraft Cassini computed using EPM2017,
the wrms $\sigma = 21.2$ m.



Полученные результаты

Для группы L4 : $M_{L4} = (6.37 \pm 0.67) \times 10^{-6} M_{\oplus}$

Для группы L5 : $M_{L5} = (3.64 \pm 0.70) \times 10^{-6} M_{\oplus}$



Сравнение с результатами других авторов



Ранее было несколько оценок массы групп троянцев Юпитера с использованием, как правило, статистических методов.

Авторы	Объекты	Масса в M_J	Масса в $M_\oplus$
Jewitt et al. (2000)	L4		$\sim 10^{-4}$
Morbidelli et al. (2005)	L4 + L5		$4 \times 10^{-6} \text{ } \therefore \text{ } 3 \times 10^{-5}$
Marchis et al. (2006)	L4 + L5		7×10^{-6}
Виноградова (2012)	L4 + L5	0.42×10^{-10}	
Виноградова, Чернетенко (2015)	L4 L5	$(0.19 \pm 0.11) \times 10^{-10}$ $(0.11 \pm 0.07) \times 10^{-10}$	$(6.3 \pm 3.7) \times 10^{-6}$ $(3.7 \pm 2.3) \times 10^{-6}$
Li, Sun (2018)	L4 + L5		18.61×10^{-6}
Питьева, Питьев (2018)	L4 L5	$(0.191 \pm 0.020) \times 10^{-10}$ $(0.109 \pm 0.021) \times 10^{-10}$	$(6.37 \pm 0.67) \times 10^{-6}$ $(3.64 \pm 0.70) \times 10^{-6}$



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Точность траекторных измерений КА и современных планетных эфемерид ЕРМ в настоящее время позволяет выявлять тонкие эффекты в движениях планет.
- В частности, оказалось возможным впервые получить из наблюдений динамическую оценку массы групп троянцев Юпитера L4 и L5.
- Показана необходимость учитывать их возмущения для Марса и Юпитера (КА Juno).
- Полученные оценки масс для L4 и L5 близки к очень хорошим статистическим оценкам в работе [Виноградовой и Чернетенко, 2015](#), но наша погрешность динамических оценок массы меньше.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ