

АСТРОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ПЛАНЕТНЫХ ЭФЕМЕРИД

Е.В. Питьева

**Институт прикладной астрономии РАН,
г. Санкт-Петербург, Россия**

Пулково –2015, 21-25 сентября 2015, ИПА РАН

Астрометрические оптические наблюдения

1913 г. : улучшенный микрометр в

Морской обсерватории США (Naval Observatory)

измерения стали более точными: 0.5''

Оптические наблюдения внешних планет

и их спутников 1913 – 2013 гг., наблюдений: 72049

USNO Pulkovo Nikolaev Tokyo Bordeaux La Palma Lowell Flagstaff TMO Pico dos Dias	Тип набл.	Интервал	Априорная точность
	прохождения	1913–1994	1'' → 0''5
	ф-э прохождения	1963–1998	0''8 → 0''25
	фотографические	1913–1998	1'' → 0''2
	ПЗС	1995–2013	0''2 → 0''05



Радиолокация поверхностей планет

В 1961 г.: успешная радиолокация Венеры
одновременно

- Массачусетский технологический институт (США)
- Калифорнийский технологический институт (США)
- Институте радиотехники и электроники (СССР)
- Радиообсерватория Джодрелл – Бэнк (Великобритания)

Радарные наблюдения Меркурия, Венеры, Марса,
1961–1997 гг., наблюдени: 58112

Millstone Haystack Arecibo Goldstone Crimea	Тип набл.	Интервал	Априорная точность
	ranging	1961–1997	100 км → 150 м

Траекторные измерения космических аппаратов

Траекторные данные КА, полученные в 1971 – 2014 гг.
нормальные точки: 52556

Mariner – 9	Венера
Mariner – 10	Меркурий
Pioneer – 10, 11	Юпитер
Voyager – 1, 2	Юпитер
Voyager – 1, 2	Сатурн
Voyager – 2	Уран
Voyager – 2	Нептун
Phobos	Марс
Ulysses	Юпитер
Magellan	Венера
Galileo	Юпитер
Viking – 1, 2	Марс
Pathfinder	Марс
MGS	Марс
Odyssey	Марс
MRO	Марс
Cassini	Сатурн
VEX	Венера
Messenger	Меркурий
MEX	Марс

Тип набл.	Интервал	Априорная точность
ranging	1971–2014	6 км → 1 м
dif.range	1976–1997	1.3 → 0.1 мм/с
rad.velos.	1992–1994	0.1 → 0.002 мм/с
flybys 3-D	1973–2009	400 mas → 0.4 mas
ΔVLBI	1990–2014	12 mas → 0.13 mas

Наблюдения



> **800000** наблюдений использовалось для улучшения ЕРМ2014.

Количество наблюдений увеличилось на порядок с ЕРМ2000.

Планета	Радио		Оптика	
	Интервал наблюд.	Число норм.точек	Интервал наблюдений	Число наблюдений
Меркурий	1964-2009	757	—	—
Венера	1961-2013	3799	—	—
Марс	1965-2014	47755	—	—
Юпитер+4сп.	1973-1997	51	1914-2013	14866
Сатурн+9 сп.	1979-2014	188	1913-2013	16455
Уран+4 сп.	1986	3	1914-2013	12550
Нептун+1сп.	1989	3	1913-2013	12404
Плутон	—	—	1914-2013	16674
<i>Всего</i>	<i>1961-2014</i>	<i>52556</i>	<i>1913-2013</i>	<i>72049</i>
ЕРМ2011	<i>+2010-14</i>	<i>+6165</i>	<i>+2011-2014</i>	<i>+14489</i>

Современная точность лучших наблюдений

Оптика: 0. 05" (ПЗС)

σ = ошибки измерений, ошибки положений и среднего движения каталогов

Радио (ranging — времена запаздываний \times скорость света)

Локация поверхностей: $\sigma = 150$ м — ошибки топографии поверхностей планет

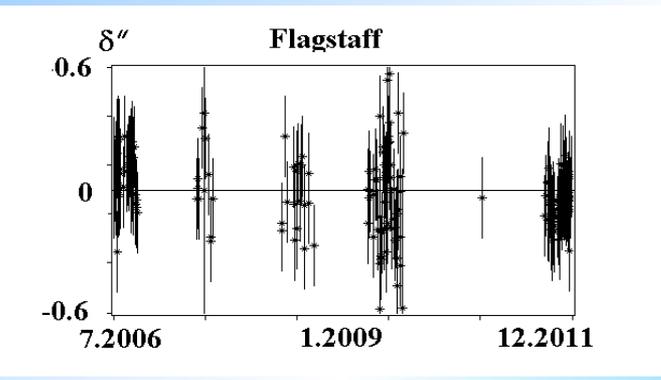
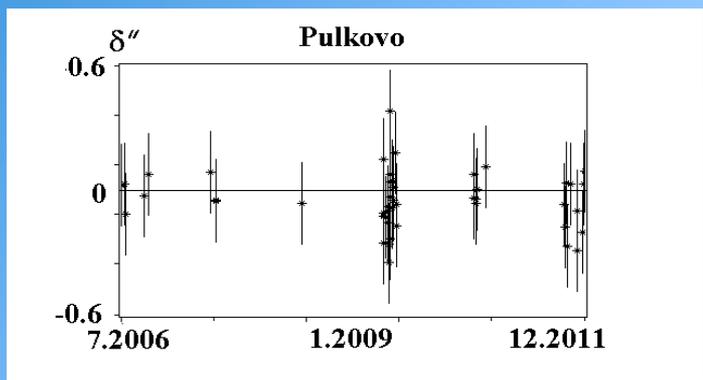
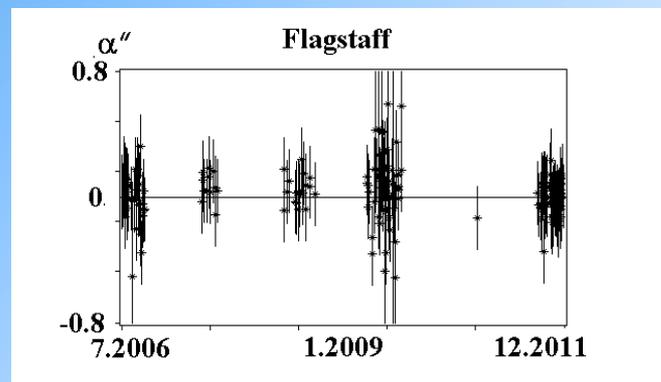
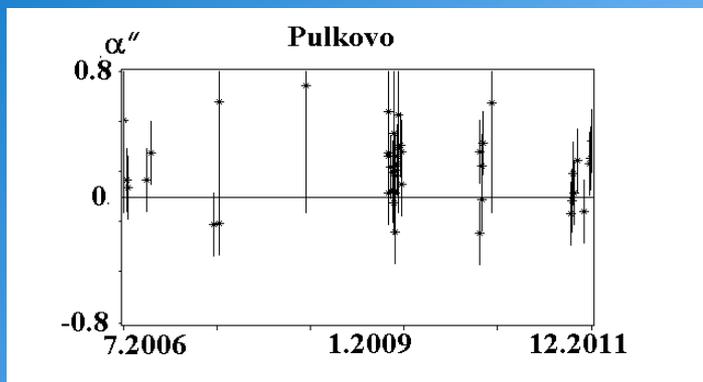
Траекторные данные КА: $\sigma =$ несколько метров — ошибки запаздывания в аппаратуре, солнечной короне

РСДВ (Δ VLBI) ориентация: $\sigma =$ десятые доли mas

+ случайные и систематические ошибки,
которые можно выявлять из сравнения О-С наблюдений,
выполненных на разных обсерваторий и посчитанных по
разным эфемеридам



Сравнение О-С наблюдений Урана в Пулковско (47) и Флагстаффе (956) 2006 – 2011 гг.



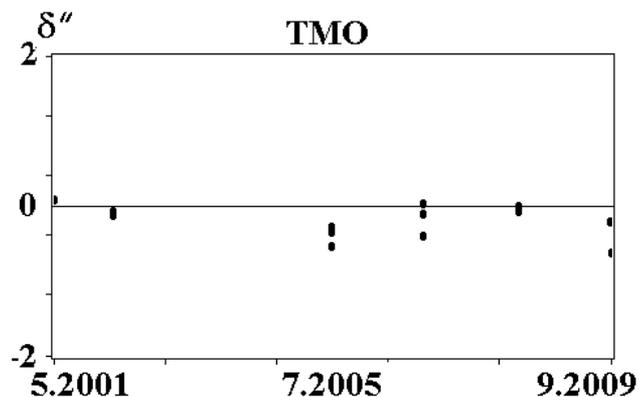
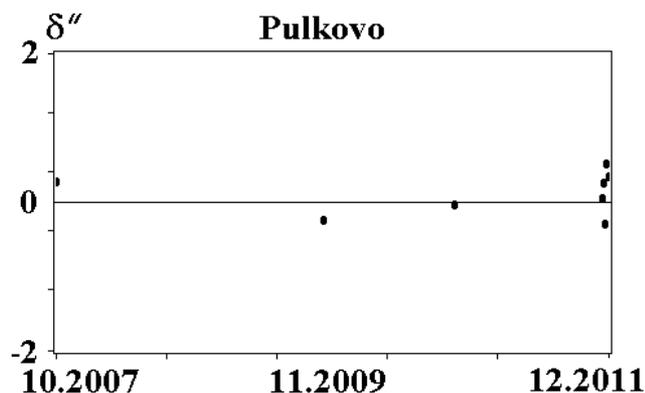
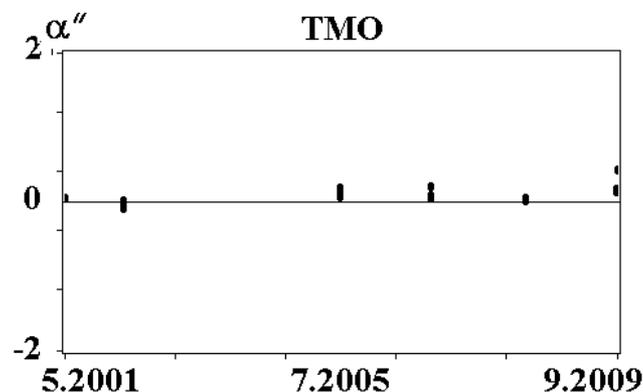
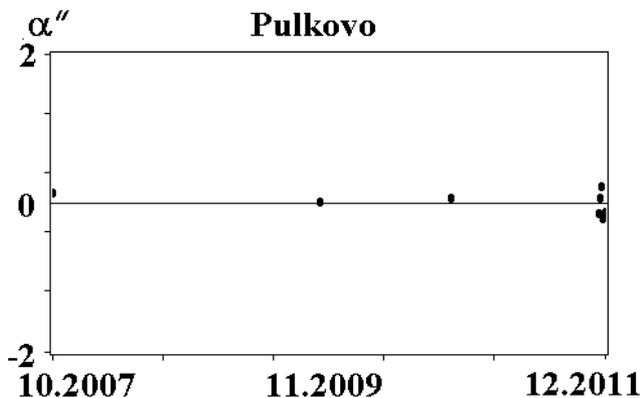
$$v_{\text{acos}\delta} = 0.118'', \quad \sigma_{\text{acos}\delta} = \underline{0.207''}$$

$$v_{\text{acos}\delta} = 0.062'', \quad \sigma_{\text{acos}\delta} = \underline{0.138''}$$

$$v_{\delta} = -0.050'', \quad \sigma_{\delta} = \underline{0.144''}$$

$$v_{\delta} = 0.005'', \quad \sigma_{\delta} = \underline{0.150''}$$

Сравнение О-С наблюдений Ariel -Уран(1) в Пулково (8) 2007–2011 и ТМО (19) 2001–2009 гг.



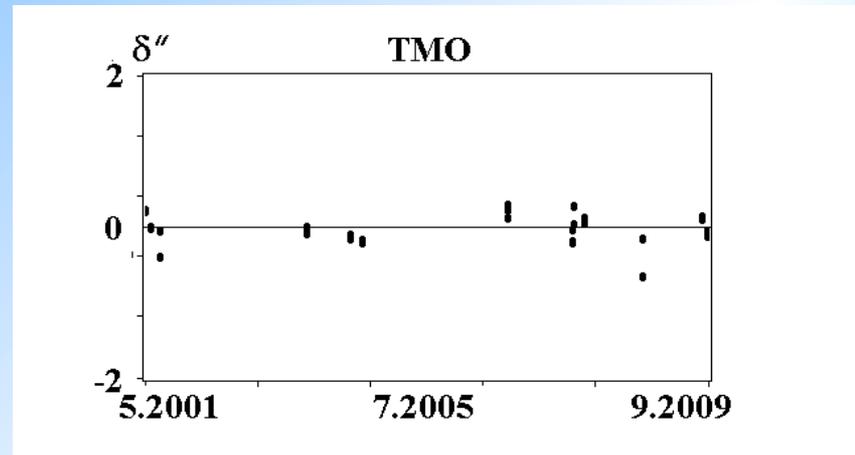
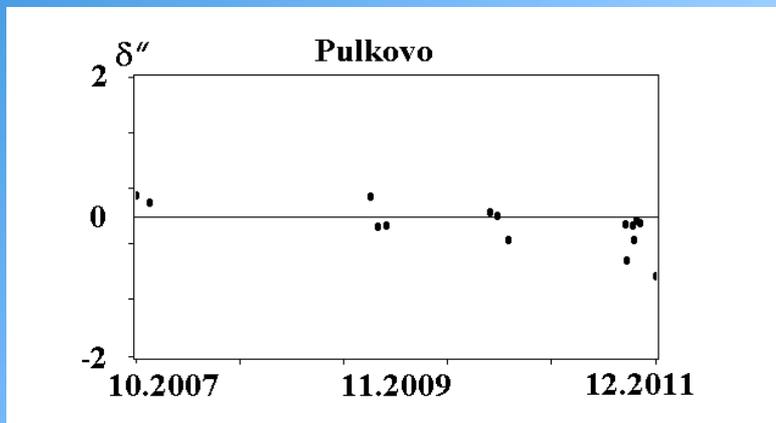
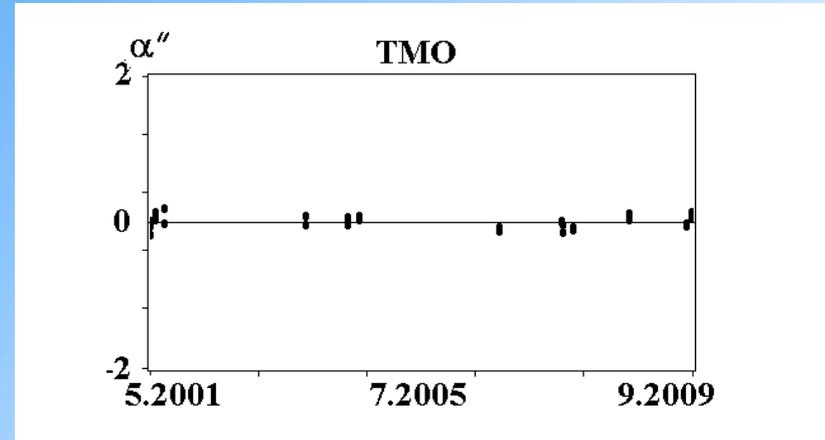
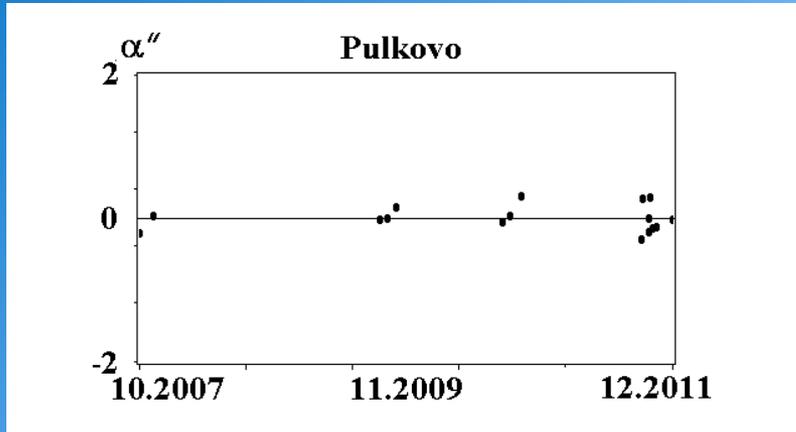
$$v_{acos\delta} = -0.005'', \quad \sigma_{acos\delta} = \underline{\underline{0.140''}}$$

$$v_{\delta} = 0.051'', \quad \sigma_{\delta} = \underline{\underline{0.247''}}$$

$$v_{acos\delta} = 0.056'', \quad \sigma_{acos\delta} = \underline{\underline{0.096''}}$$

$$v_{\delta} = -0.102'', \quad \sigma_{\delta} = \underline{\underline{0.160''}}$$

Сравнение О-С наблюдений Umbriel -Уран(2) в Пулково (16) 2007–2011 гг. и ТМО (37) 2001–2009 гг.



$$v_{\text{acos}\delta} = -0.006'', \quad \sigma_{\text{acos}\delta} = \underline{0.175''}$$

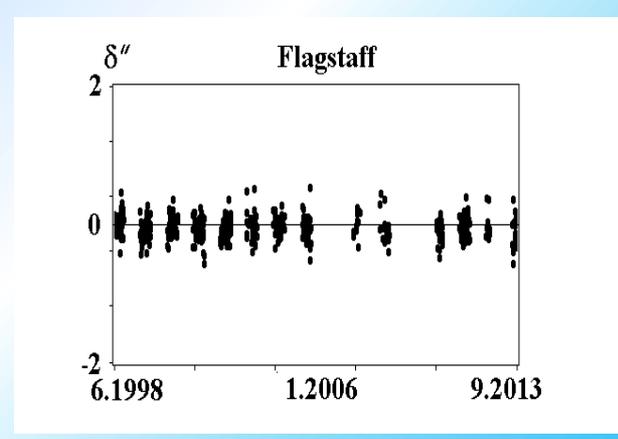
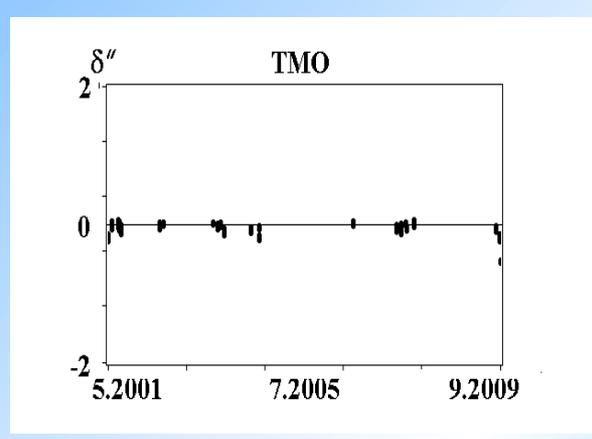
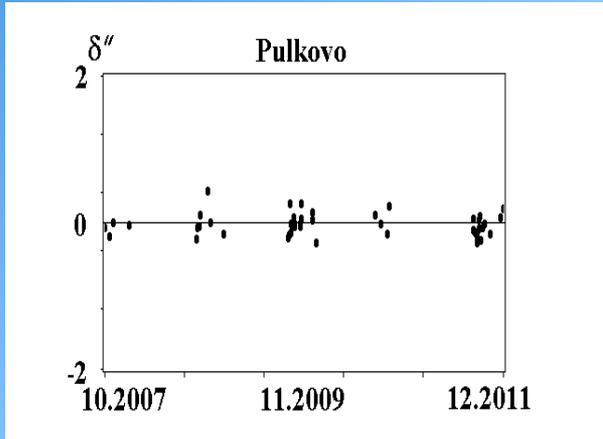
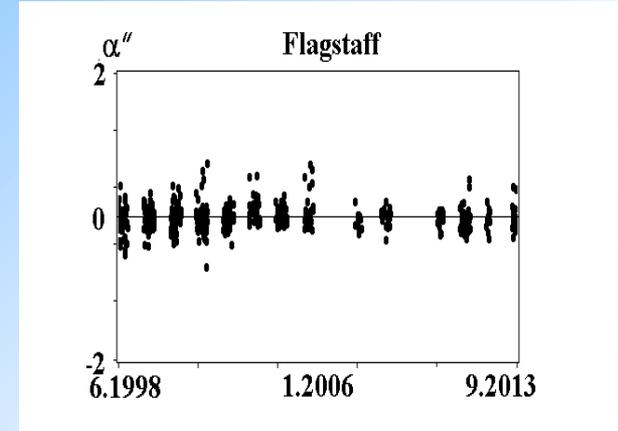
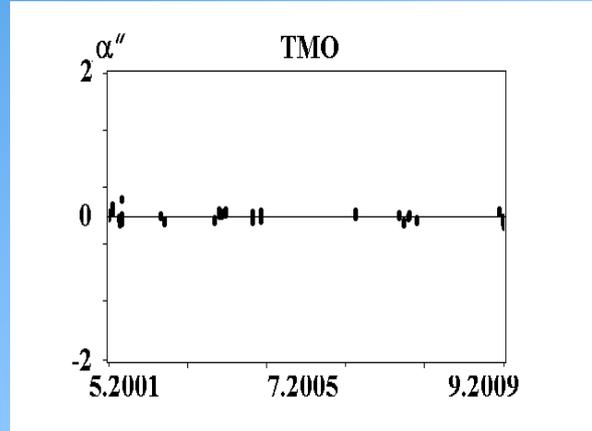
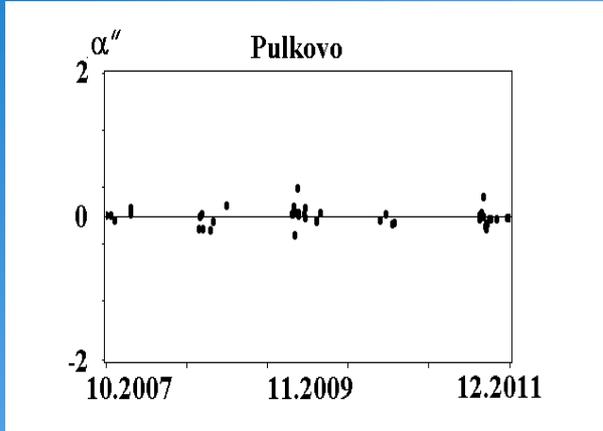
$$v_{\delta} = -0.052'', \quad \sigma_{\delta} = \underline{0.247''}$$

$$v_{\text{acos}\delta} = 0.002'', \quad \sigma_{\text{acos}\delta} = \underline{0.084''}$$

$$v_{\delta} = -0.021'', \quad \sigma_{\delta} = \underline{0.159''}$$

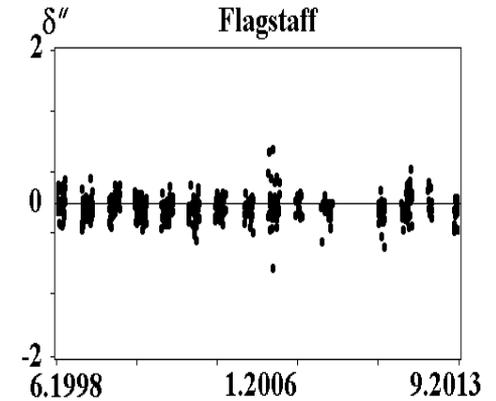
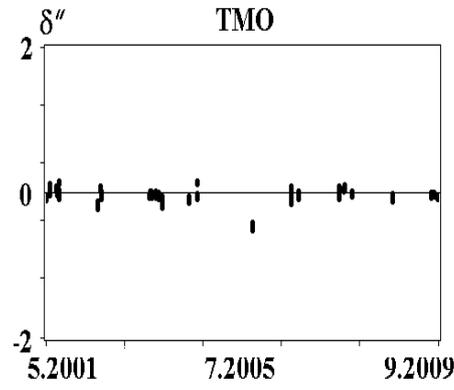
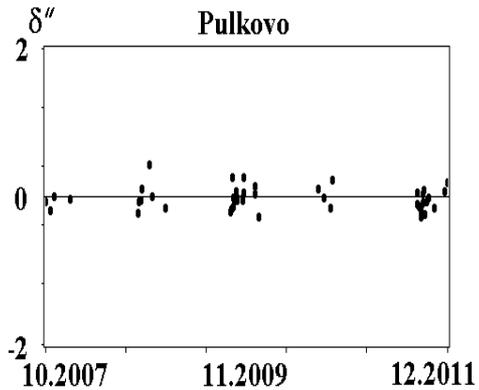
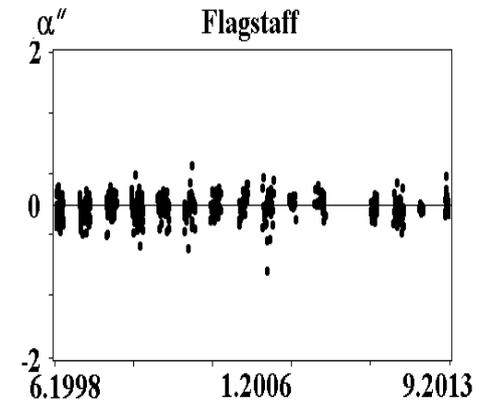
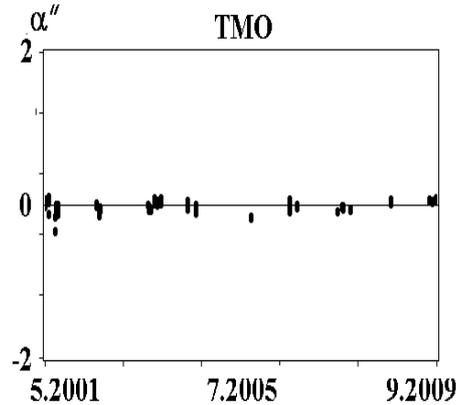
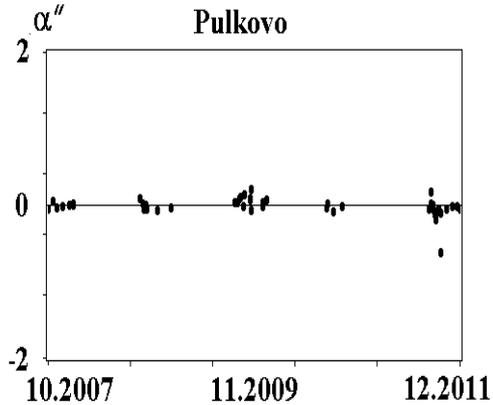


Сравнение О-С наблюдений Titania -Уран(3) в Пулково (46) 2007–2011, ТМО (87) 2001–2009 и в Флагстаффе (485) 1998 –2013 гг.



$v_{\alpha \cos \delta} = -0.016''$, $\sigma_{\alpha \cos \delta} = \underline{0.117''}$	$v_{\alpha \cos \delta} = -0.014''$, $\sigma_{\alpha \cos \delta} = \underline{0.068''}$	$v_{\alpha \cos \delta} = -0.035''$, $\sigma_{\alpha \cos \delta} = \underline{0.142''}$
$v_{\delta} = -0.047''$, $\sigma_{\delta} = \underline{0.146''}$	$v_{\delta} = -0.060''$, $\sigma_{\delta} = \underline{0.086''}$	$v_{\delta} = -0.053''$, $\sigma_{\delta} = \underline{0.159''}$

Сравнение О-С наблюдений Oberon -Уран(4) в Пулково (50) 2007–2011, ТМО (117) 2001–2009 и в Флагстаффе (588) 1998 –2013 гг.

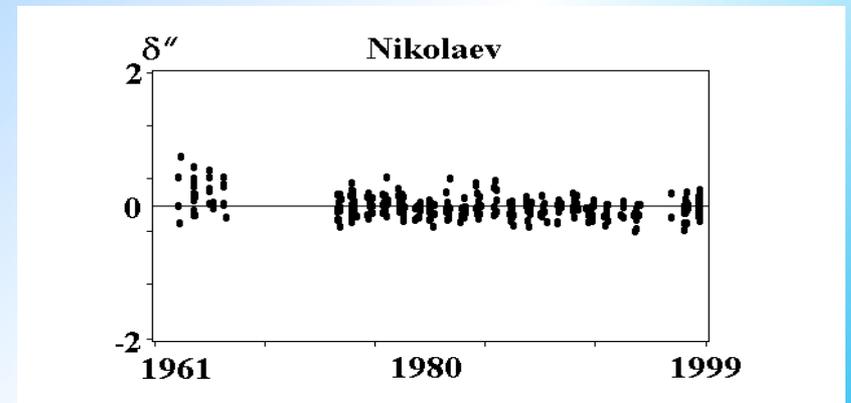
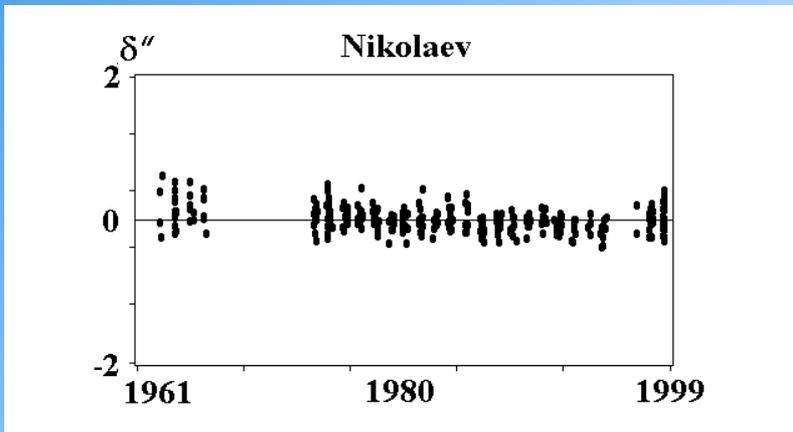
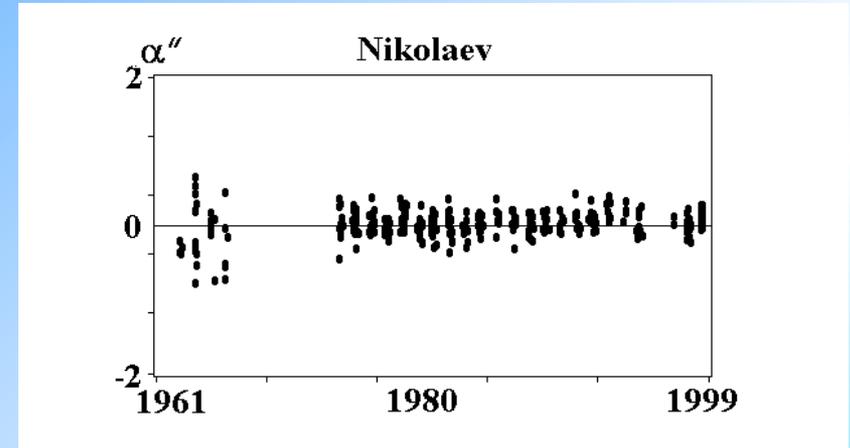
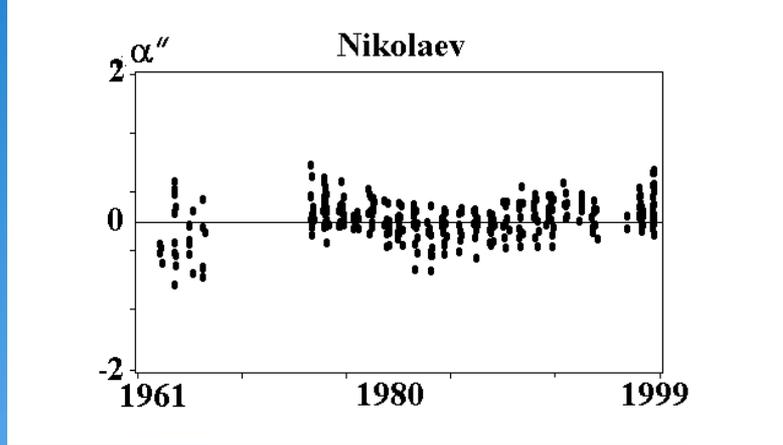


$v_{\alpha \cos \delta} = -0.018''$, $\sigma_{\alpha \cos \delta} = \underline{0.083''}$	$v_{\alpha \cos \delta} = -0.027''$, $\sigma_{\alpha \cos \delta} = \underline{0.077''}$	$v_{\alpha \cos \delta} = -0.040''$, $\sigma_{\alpha \cos \delta} = \underline{0.137''}$
$v_{\delta} = -0.033''$, $\sigma_{\delta} = \underline{0.100''}$	$v_{\delta} = -0.036''$, $\sigma_{\delta} = \underline{0.069''}$	$v_{\delta} = -0.62''$, $\sigma_{\delta} = \underline{0.147''}$

Сравнение О-С наблюдений Егоре – Юпитер (2), полученных в Николаеве (331) в 1961–1998 гг. и ВЫЧИСЛЕННЫХ ПО



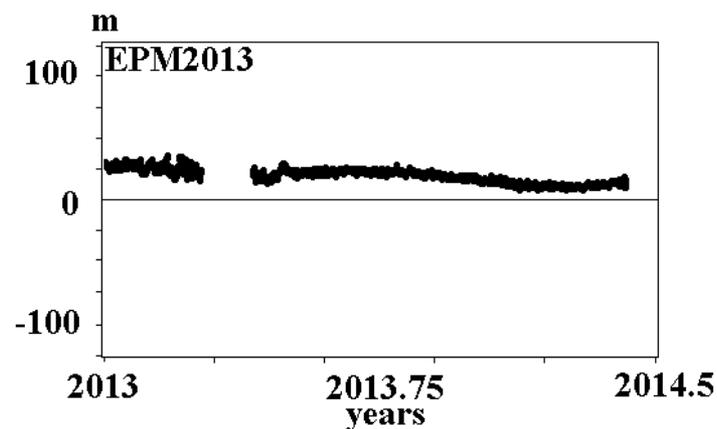
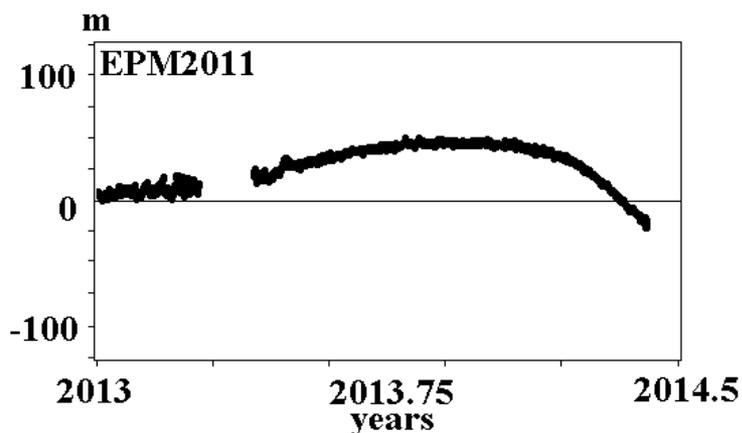
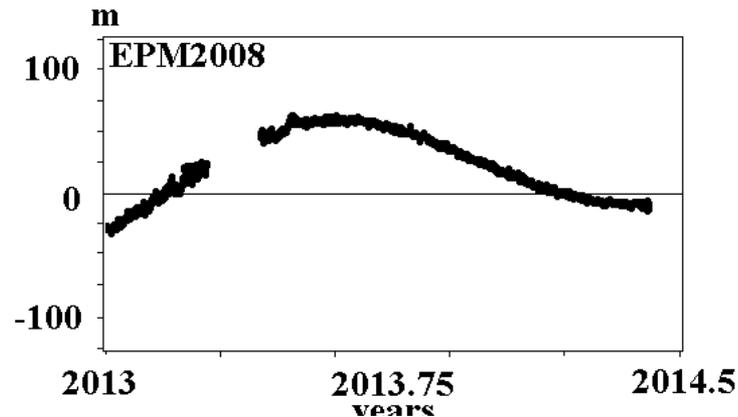
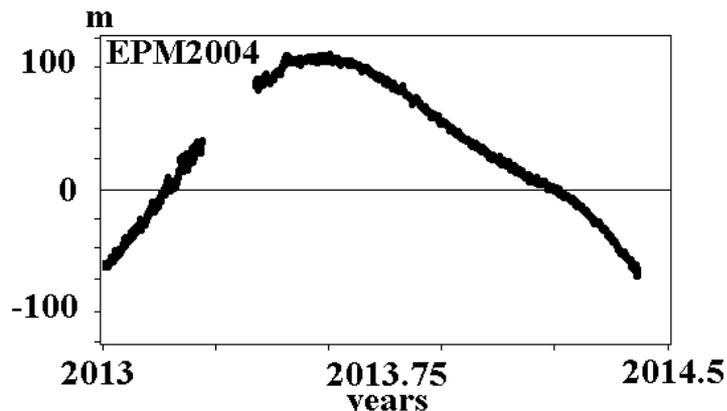
численной эфемериде и аналитической теории



$$v_{\alpha \cos \delta} = 0.040'', \quad \sigma_{\alpha \cos \delta} = \underline{0.187''}$$
$$v_{\delta} = -0.012'', \quad \sigma_{\delta} = \underline{0.154''}$$

$$v_{\alpha \cos \delta} = 0.031'', \quad \sigma_{\alpha \cos \delta} = \underline{0.154''}$$
$$v_{\delta} = -0.027'', \quad \sigma_{\delta} = \underline{0.141''}$$

Эволюция эфемеридной точности



Остаточные невязки времен запаздывания КА МЕХ от 01.01.2013 до 05.05.2014 (до улучшения и использования в EPM2013),

вычисленные для

EPM2004: rms = 63 m,

EPM2008: rms = 34 m,

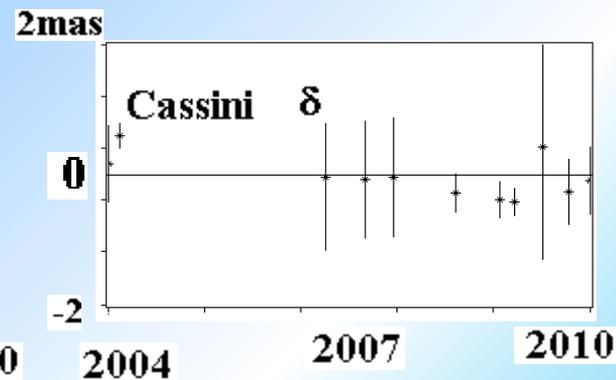
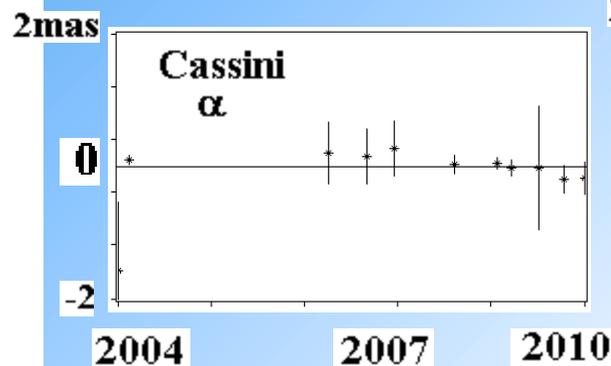
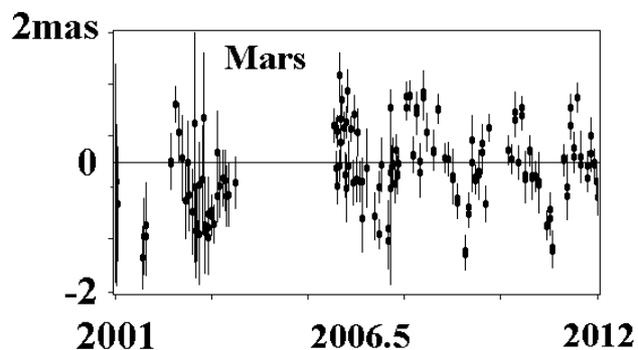
EPM2011: rms = 29 m,

EPM2013: rms = 20 m

Ориентация ЕРМ в ICRF2



ЕРМ2014 были ориентированы в ICRF2 с точностью лучше, чем 1 mas, включением в общее решение 290 РСДБ данных КА (Magellan, Phobos, MGS, Odyssey, Venus Express, and Mars Reconnaissance Orbiter, Cassini) около Венеры, Марса, Сатурна на фоне ICRF2 квазаров, полученных в 1989 – 2013 гг.



О-С РСДБ данных КА

Углы вращения для ориентации ЕРМ2014 в ICRF2

Интервал	Число наблюд.	ϵ_x mas	ϵ_y mas	ϵ_z mas
1989-1994	20	4.5 ± 0.8	-0.8 ± 0.6	-0.6 ± 0.4
1989-2003	62	1.9 ± 0.1	-0.5 ± 0.2	-1.5 ± 0.1
1989-2007	118	-1.528 ± 0.062	1.025 ± 0.06	1.271 ± 0.046
1989-2010	213	-0.000 ± 0.042	-0.025 ± 0.048	0.004 ± 0.028
1989-2013	290	0.002 ± 0.038	0.001 ± 0.041	0.000 ± 0.025

Редукции радарных наблюдений

- Релятивистские редукции — запаздывание сигнала в гравитационных полях Солнца, Юпитера, Сатурна (эффект Шапиро) и редукция наблюдений с переходом от координатного времени эфемерид к собственному времени наблюдателя;
- запаздывание в тропосфере Земли;
- запаздывание в солнечной короне, параметры ее модели определяются из наблюдений для каждого соединения (необходимы наблюдения на нескольких частотах!);
- поправки за топографию поверхностей планет (Меркурий, Венера, Марс).

Редукции оптических наблюдений

- опорные каталоги => FK4 => FK5 => ICRF;
 - поправки за дополнительный эффект фазы (основные поправки за фазу внесены самими наблюдателями);
 - релятивистские поправки за отклонение света.
- + TT-TDB получены численным интегрированием EPM

Точность эфемерид тел Солнечной системы зависит от нескольких факторов:

- количества и качества наблюдательной базы,**
- редукации наблюдений,**
- Динамических моделей движения тел Солнечной системы.**

Эволюция эфемерид ЕРМ ИПА РАН



ЕРМ87 (Krasinsky et al., 1993) :

- взаимные возмущения больших планет, Солнца, Земли и 5 массивных астероидов;
- релятивистские возмущения.

+ ЕРМ98 (Питьева, 1998):

- Возмущения от других 296 астероидов, выбранных из-за их значительных возмущений Марса и Земли;
- возмущения, учитывающие фигуры Земли и Луны.

+ ЕРМ2000 (Pitjeva, 2001):

- Возмущения от динамического сжатия Солнца J_2 ($J_2=2\cdot 10^{-7}$), определяемое из наблюдений.

+ ЕРМ2004 (Питьева, 2005):

- возмущения от одномерного массивного астероидного кольца с однородным распределением массы с уточняемым радиусом и массой (предложено Красинским (**Krasinsky, et al., 2002**), реализовано для ЕРМ2004).

+ ЕРМ2008 (Pitjeva, 2010):

- Возмущения от 21 крупнейшего транс-нептунового объекта (ТНО).

+ ЕРМ2011 (Питьева, 2013):

- возмущения от массивного кольца ТНО, расположенного в плоскости эклиптики с радиусом $R=43$ au.

+ ЕРМ2013/ЕРМ2014 (Pitjeva & Pitjev, 2014):

- возмущения от массивного однородного **двухмерного астероидного кольца** ($R_1= 2.06$ au, $R_2 = 3.27$ au);
- возмущения от **30 крупнейших ТНО**.

Влияние разных наборов наблюдений на эфемериды Плутона

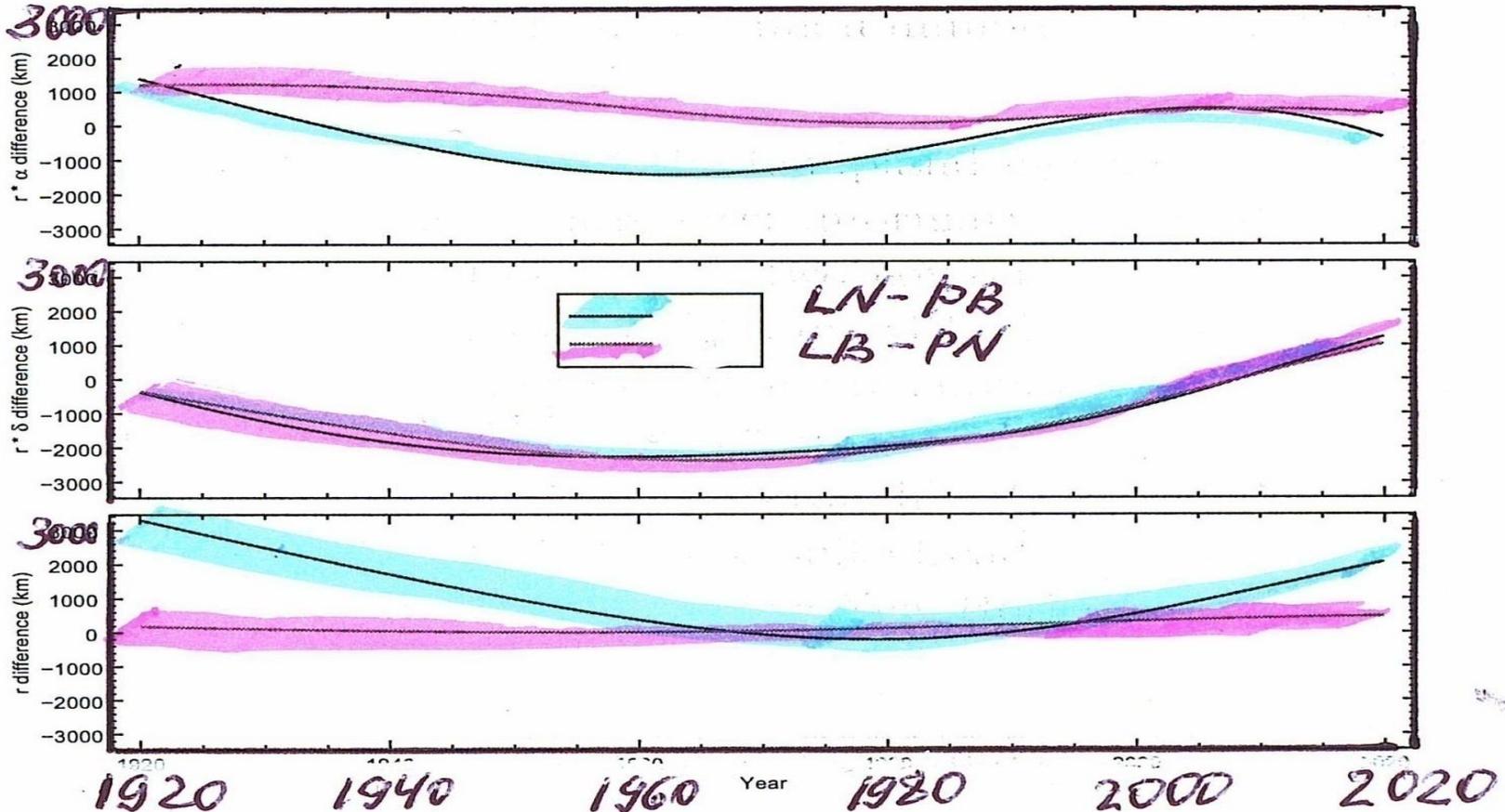


Buie & Folkner: 2015, AJ, v.149, Issue 1, article id. 22, 13 pp.

L – Lowell Observatory, Carl Lampland, 1930-1951;

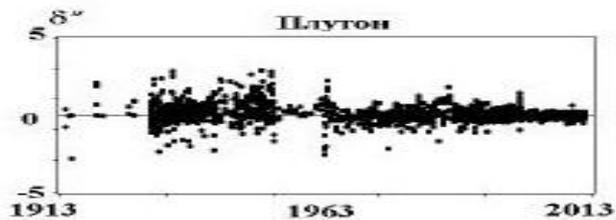
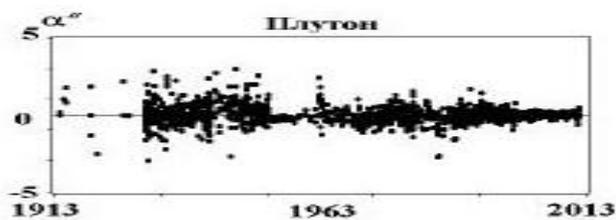
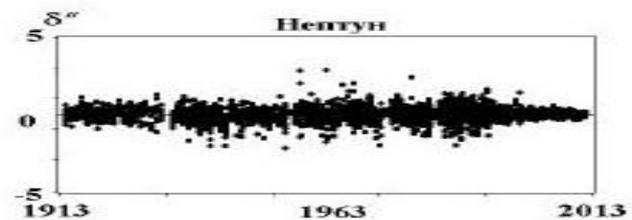
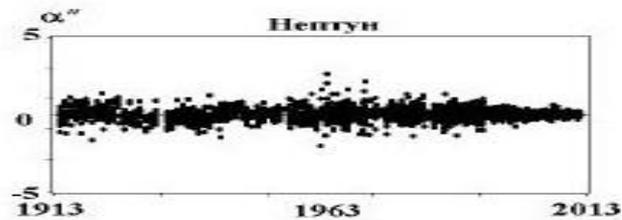
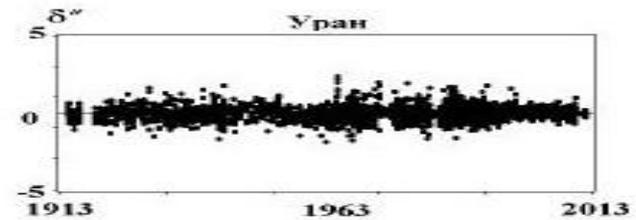
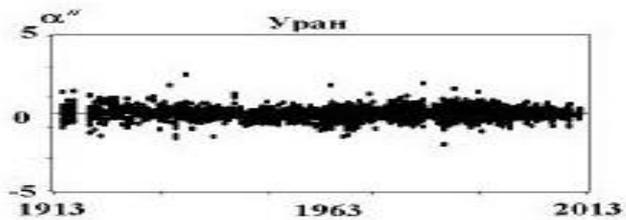
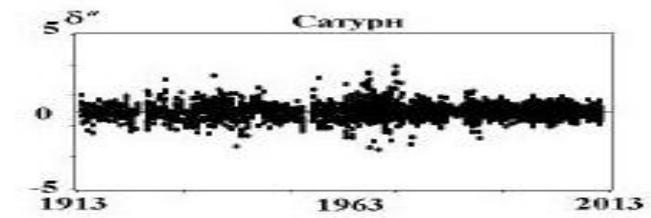
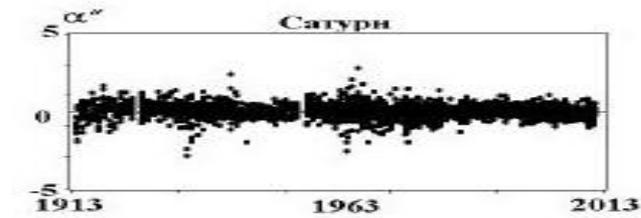
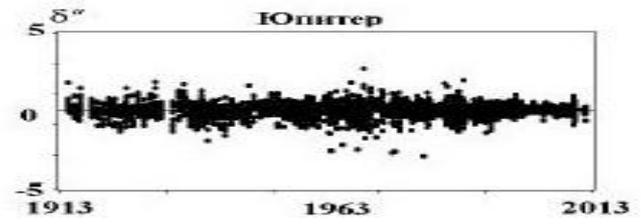
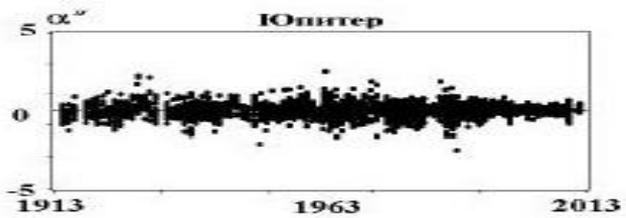
P – Pulkovo Observatory, 1930-1992;

N – Flagstaff+TMO, 1995-1913; B – Pico dos Dias, Brazil, 1995-2013

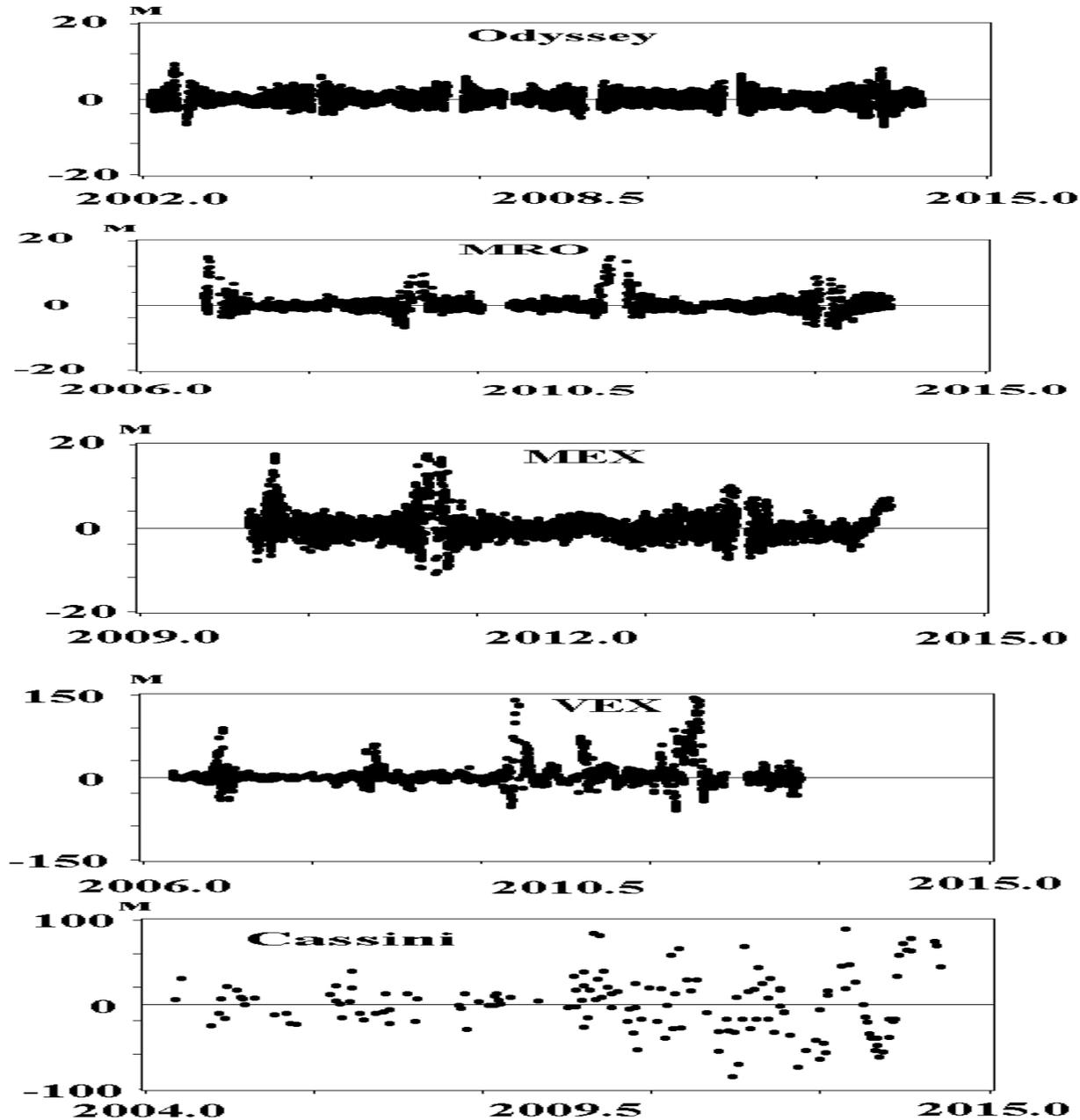


Формальные стандартные ошибки (σ) орбитальных элементов внешних планет для разных наборов наблюдений

Планета	a [км]	$\sin i \cos \Omega$ [mas]	$\sin i \sin \Omega$ [mas]	$e \cos \pi$ [mas]	$e \cos \pi$ [mas]	λ [mas]
<u>Юпитер-О</u> + сп. 1–4 + радио КА	1.693 0.588 0.347	10.912 2.268 2.005	10.854 2.314 1.808	6.188 1.258 0.128	5.497 1.197 0.109	11.431 2.361 0.882
<u>Сатурн-О</u> + сп. 1–9 + радио КА	10.823 3.437 0.00483	14.795 1.731 0.08065	14.584 2.333 0.05726	8.136 1.428 0.0009 7	7.440 1.310 0.00035	18.452 3.376. 0.01239
<u>Уран-О</u> + сп. 1–4 + радио КА	33.779 32.554 30.033	4.321 3.960 3.453	4.256 3.138 3.007	3.795 3.198 2.849	3.666 3.630 2.003	5.993 5.643 3.592
<u>Нептун-О</u> + сп. 1–4 + радио КА	314.462 288.699 270.470	4.253 4.082 2.669	5.718 4.918 5.195	7.025 5.983 5.546	14.747 13.800 13.540	13.650 12.061 12.345
<u>Плутон-О</u> + L, B	1200.101 724.911	1.881 0.843	7.070 3.914	25.289 16.539	19.029 11.180	13.716 6.257



О–С наблюдений внешних планет: $\alpha \cos \delta$ и δ , 1913-2011 гг.; шкала $\pm 5''$



**rms O-C времен запаздывания КА Odyssey – 1.2 м, MRO – 1.2 м,
MEX – 1.5 м, VEX – 3.1 м, Cassini – 22 м.**

Формальные стандартные ошибки (σ) орбитальных элементов планет для EPM2004 и EPM2014 эфемерид



Ephemeris	Planet	a [m]	$\sin i \cos \Omega$ [mas]	$\sin i \sin \Omega$ [mas]	$e \cos \pi$ [mas]	$e \sin \pi$ [mas]	λ [mas]
EPM2004	Mercury	0.105	1.654	1.525	0.123	0.099	0.375
EPM2014		0.065	0.7976	0.5545	0.0857	0.06874	0.1536
EPM2004	Venus	0.329	0.567	0.567	0.041	0.043	0.187
EPM2014		0.004	0.00315	0.00255	0.00013	0.00013	0.00312
EPM2004	Earth	0.146	—	—	0.001	0.001	—
EPM2014		0.005	—	—	0.00005	0.00005	—
EPM2004	Mars	0.657	0.003	0.004	0.001	0.001	0.003
EPM2014		0.015	0.00077	0.00082	0.00007	0.00013	0.00039
EPM2004	Jupiter	639	2.410	2.207	1.280	1.170	1.109
EPM2014		347	2.005	1.808	0.128	0.109	0.882
EPM2004	Saturn	4222	3.237	4.085	3.858	2.975	3.474
EPM2014		4.828	0.08065	0.05726	0.00097	0.00035	0.01239
EPM2004	Uranus	38484	4.072	6.143	4.896	3.361	8.818
EPM2014		30033	3.453	3.007	2.849	2.003	3.592
EPM2004	Neptune	478532	4.214	8.600	14.066	18.687	35.163
EPM2014		270479	2.669	5.195	5.546	13.540	12.345
EPM2004	Pluto	3463309	6.899	14.940	82.888	36.700	79.089
EPM2014		724911	0.843	3.914	16.559	11.180	6.257

σ орбитальных элементов Венеры, Земли, Марса, Сатурна уменьшились на порядок и больше, Плутона в несколько раз.

Заключение



Астрометрические наблюдения являются основой для построения планетных эфемерид и одним из основных факторов повышения их точности. Хотя эфемериды внутренних планет целиком основаны на радиотехнических наблюдениях, но оптические наблюдения по-прежнему необходимы для уточнения эфемерид внешних планет, особенно эфемерид Плутона.

Исключительно важно получение наблюдательных данных на разных обсерваториях (например, Flagstaff и Пулково), что позволяет судить о реальной точности наблюдений и учитывать этот фактор при улучшении эфемерид.

Прогресс в точности планет эфемерид объясняется ростом количества наблюдательных данных, улучшением качества этих наблюдений и их редукций, а также уточнением динамических моделей движения небесных тел.



Спасибо за внимание !

Пулково –2015, 21-25 сентября 2015, ИПА РАН