

РЕЗУЛЬТАТЫ АСТРОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ГАЛИЛЕЕВЫХ СПУТНИКОВ ЮПИТЕРА НА НОРМАЛЬНОМ АСТРОГРАФЕ ПУЛКОВСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ В 2016-2018 годах

Нарижная Н.В., Ховричев М.Ю.,
Бикулова Д.А., Куликова А.М.,
Апетян А.А.

Главная (Пулковская)
астрономическая обсерватория
Российской академии наук



Астрометрические наблюдения планет и их естественных спутников играют фундаментальную роль в изучении динамики Солнечной системы. Они используются при построении и уточнении теорий движения больших планет и их спутников, а также для оценки точности существующих эфемерид. Высокоточные эфемериды важны для поддержки космических проектов и миссий. На протяжении

последних десятилетий

Пулковская обсерватория наряду с другими российскими и зарубежными обсерваториями участвует в этой программе наблюдений.



Наблюдения и обработка данных

Наши наблюдения галилеевых спутников Юпитера были выполнены в **2016 - 2018** гг. Использовалась ПЗС – камера с рабочим полем: **35'×25'** и масштабом: **0.530"/пиксел**.

В **тб.1** приведены количественные оценки итогов наблюдений

Год	Число ночей	Число положений спутников					Число обработанных кадров	Число опорных звезд	Интервал зенитных расстояний
		Все	J1	J2	J3	J4			
2016-2017	20	761	146	180	180	255	3340	6 - 18	50°-70°
2018	28	452	100	102	131	119	2580	17 -46	75°-80°

Условия наблюдений были более приемлемыми в отношении зенитного расстояния Юпитера в **2016-17**, но в отношении количества опорных звезд - в **2018**.

Для автоматизации измерений большого массива кадров был создан набор приложений **JSA**, позволяющий определить **WCS-параметры** (набор констант, способствующих однозначно перейти от пиксельных координат к экваториальным и наоборот) и вписать их в блок метаданных для каждого кадра.

Схематическое описание методики обработки можно представить такими этапами.

Шейплет-декомпозиция изображений звезд



Построение медианной PSF



Определение пиксельных координат методом
Левенберга-Марквардта



Аппроксимация и учет фона

Для одной из ночей (17.02.2016 г) была проведена обработка наблюдений двумя разными методами.
Результаты представлены в **Таб.2.**

Методы обработки наблюдений	(O-C) α угл.с	(O-C) δ угл.с	ε_{α} угл.с	ε_{δ} угл.с	σ_{α} угл.с	σ_{δ} угл.с	N
Программный комплекс IZMCCD	0.040	0.003	0.010	0.007	0.132	0.085	159
JSA	0.041	0.027	0.005	0.005	0.045	0.043	85

Для (O-C) по прямому восхождению результаты хорошо согласуются между собой.

По склонению различие с трудом укладывается в пределы
“3-сигм”

Причинами этого может быть: использование разных опорных каталогов; иной подход к отбраковке “плохих” кадров.

В **IZMCCD** имеется возможность вручную отбраковывать звезды, подбирая вариант астрометрической редукции с наименьшими значениями ошибок единицы веса. Поэтому есть шанс выйти на нужные показатели по уровню ошибки единицы веса даже в случае кадров с низким качеством изображения.

Но это требует со стороны пользователя **больших временных затрат** при обработке, особенно, когда речь идет о внушительном количестве ПЗС-кадров.

В **JSA** автоматически отбраковываются снимки, имеющие средние значения **FWHM** (ширина профиля звезды на полувысоте), на “3-сигма” отличающиеся от средних за данную ночь. **JSA** обеспечивает более высокую однородность результатов, так как использует единую стратегию анализа для всех кадров.

Сравнение наблюдений с теорией и анализ внешней точности результатов

Анализ результатов полученных нами наблюдений был выполнен путем сравнения их с 16 вариантами, использующими комбинации 4 наиболее современных теорий движения спутников Юпитера: **V. Lainey-V.2.0|V1.1, V. Lainey-V.1.1, J.-E. Arlot-G5, J.H. Lieske-E5** и 4 планетных теорий: **ERPM2015, INPOP13C, INPOP08, DE431**. Эфемериды обеспечивались Службой естественных спутников планет “MULTI-SAT”. В **таб. 3а,3б** приведены значения разностей (О-С) по обеим координатам, усредненные за весь период наблюдений по двум сезонам.

Таб. 3а. Средние значения разностей (О-С) по обеим координатам для Галилеевых спутников усредненные за весь период набл. **2016-2017гг.**

Теория движения спутника	Ио (J1)		Европа (J2)		Ганимед (J3)		Каллисто (J4)	
	(О-С) α	(О-С) δ	(О-С) α	(О-С) δ	(О-С) α	(О-С) δ	(О-С) α	(О-С) δ
Планетная теория EPM2015								
V.Lainey V2.0.	0.021	0.020	0.026	0.017	0.028	-0.032	0.032	0.038
V.Lainey V1.1.	0.021	0.023	0.021	0.005	0.037	-0.032	0.030	0.043
J.-E.Arlot G5	0.015	0.025	0.039	0.002	0.086	-0.059	-0.009	0.045
D.Lieske E5	0.019	0.022	0.034	0.015	0.074	-0.054	0.004	0.044
Планетная теория INPOP13C								
V.Lainey V2.0.	0.032	0.023	0.036	0.020	0.038	-0.029	0.042	0.041
V.Lainey V1.1.	0.031	0.026	0.031	0.008	0.047	-0.028	0.041	0.046
J.-E.Arlot G5	0.025	0.028	0.049	0.005	0.096	-0.056	0.001	0.048
D.Lieske E5	0.029	0.025	0.044	0.018	0.085	-0.051	0.014	0.047
Планетная теория INPOP08								
V.Lainey V2.0.	-0.030	-0.002	-0.025	-0.005	-0.024	-0.054	-0.020	0.016
V.Lainey V1.1.	-0.031	0.001	-0.030	-0.017	-0.015	-0.054	-0.021	0.021
J.-E.Arlot G5	-0.037	0.002	-0.012	-0.021	0.034	-0.081	-0.061	0.022
D.Lieske E5	-0.033	-0.001	-0.017	-0.007	0.023	-0.077	-0.048	0.022
Планетная теория DE431								
V.Lainey V2.0.	0.026	0.020	0.031	0.017	0.033	-0.032	0.037	0.038
V.Lainey V1.1.	0.026	0.023	0.026	0.004	0.042	-0.032	0.035	0.043
J.-E.Arlot G5	0.020	0.024	0.044	-0.001	0.091	-0.059	-0.004	0.044
D.Lieske E5	0.024	0.021	0.039	0.014	0.079	-0.055	0.009	0.044

Таб. 36. СРАВНЕНИЕ НАБЛЮДЕНИЙ 2018 г

Теория движения спутника	Ио (J1)		Европа (J2)		Ганимед (J3)		Каллисто (J4)	
	(O-C) α	(O-C) δ	(O-C) α	(O-C) δ	(O-C) α	(O-C) δ	(O-C) α	(O-C) δ
Планетная теория EPM2015								
V.Lainey V2.0.	0.020	0.004	0.010	0.006	0.016	0.003	0.032	0.008
V.Lainey V1.1.	0.022	0.005	0.012	0.007	0.019	0.004	0.028	0.009
J.-E.Arlot G5	0.040	0.004	0.006	0.003	0.014	0.001	-0.001	0.016
D.Lieske E5	0.027	0.004	0.000	0.005	0.007	0.002	0.007	0.015
Планетная теория INPOP13C								
V.Lainey V2.0.	0.033	0.012	0.023	0.015	0.028	0.012	0.045	0.016
V.Lainey V1.1.	0.035	0.013	0.024	0.015	0.031	0.013	0.041	0.018
J.-E.Arlot G5	0.053	0.012	0.019	0.012	0.027	0.009	0.012	0.025
D.Lieske E5	0.040	0.012	0.012	0.013	0.020	0.010	0.020	0.024
Планетная теория INPOP08								
V.Lainey V2.0.	-0.043	-0.026	-0.053	-0.024	-0.047	-0.027	-0.030	-0.022
V.Lainey V1.1.	-0.041	-0.025	-0.051	-0.023	-0.045	-0.026	-0.035	-0.020
J.-E.Arlot G5	-0.023	-0.026	-0.057	-0.026	-0.049	-0.029	-0.064	-0.013
D.Lieske E5	-0.036	-0.026	-0.063	-0.025	-0.056	-0.028	-0.056	-0.015
Планетная теория DE431								
V.Lainey V2.0.	0.026	0.004	0.016	0.006	0.022	0.003	0.039	0.008
V.Lainey V1.1.	0.029	0.005	0.018	0.007	0.025	0.004	0.034	0.009
J.-E.Arlot G5	0.046	0.004	0.012	0.004	0.020	0.001	0.006	0.016
D.Lieske E5	0.033	0.004	0.006	0.005	0.013	0.002	0.014	0.015

Можно отметить хорошее согласие с наблюдениями трех из них (**INPOP13C**, **ERPM15** и **DE431**) для всех спутников, кроме Ганимеда

Для этого спутника (**2016-2017**) разности (О-С) получились самыми большими. При использовании для Ганимеда планетной теории **INPOP08**, разности получаются самыми маленькими по всем четырем спутниковым теориям. По итогам наших прошлых наблюдений у Ганимеда получались подобные результаты.

При сравнении полученных результатов (**2018**) с теми же 4 выбранными планетными теориями также необычно выделяется теория **INPOP08**. Средние значения разностей (О-С) при ее использовании стабильно имеют отрицательные значения по обеим координатам. По абсолютной величине средние разности (О-С) получились максимальными по всем спутниковым теориям. Среднее значение разности (О-С) по обеим координатам равно **-0.035"**, а по трем остальным теориям **+0.016"**.

Следует отметить также для этого сезона, что средние значения разностей (О-С) по прямому восхождению в среднем в 2.5 раза больше чем по склонению.

Возможной причиной такого поведения разностей **(O-C)** может быть несовершенство теорий движения спутника.

Однако невыгодные наблюдательные условия, взаимодействие изображений и некоторые другие неучтенные систематические эффекты могут привести к таким же результатам.

Лучшее согласие с наблюдениями дает комбинация теорий движения **ЕРМ2015** и **V. Lainey-V.2.0|V1.1.**, для которой среднее значение **(O-C)** равно **0.026"** (2016-17) и **0.012"** (2018).

В таб. 4а,4б представлены максимальные ($\sigma_{\max}$, $\varepsilon_{\max}$) и минимальные ($\sigma_{\min}$, $\varepsilon_{\min}$) среднеквадратич. откл. и ошибки, выраженные в секундах дуги, характеризующие величины (О-С) приведенные в таб. 3а,3б.

Таб.4а. Ошибки для среднеарифметических величин (О-С) за **2016-17**гг

Спутник	N	(О-С) α				(О-С) δ			
		$\sigma_{\min}$	$\varepsilon_{\min}$	$\sigma_{\max}$	$\varepsilon_{\max}$	$\sigma_{\min}$	$\varepsilon_{\min}$	$\sigma_{\max}$	$\varepsilon_{\max}$
Ио	146	0.056	0.005	0.077	0.006	0.066	0.005	0.073	0.006
Европа	180	0.058	0.004	0.060	0.004	0.061	0.005	0.064	0.005
Ганимед	180	0.053	0.004	0.099	0.007	0.097	0.007	0.105	0.008
Каллисто	225	0.053	0.003	0.130	0.008	0.056	0.004	0.080	0.005

Таб.4б. Среднеквадратич. отклонения;ошиб.сред.за **2018** г

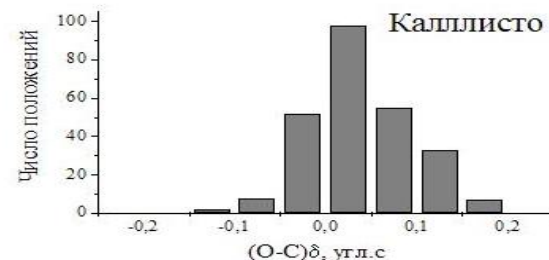
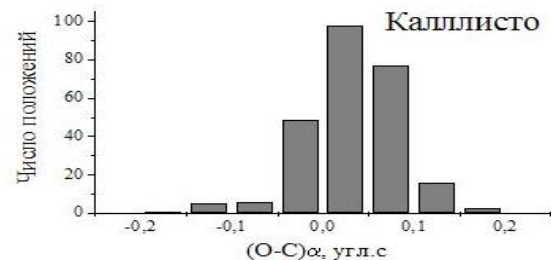
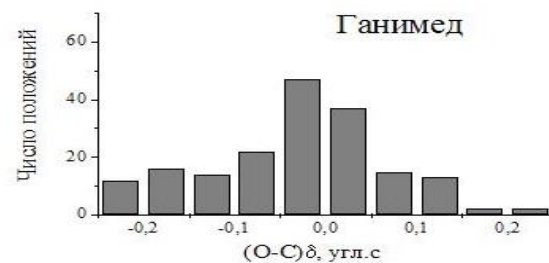
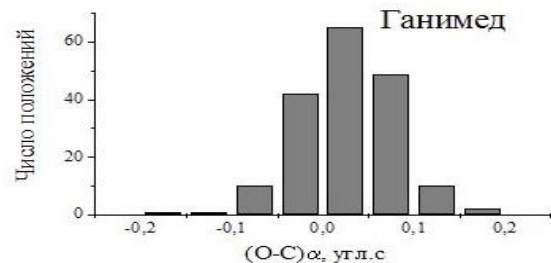
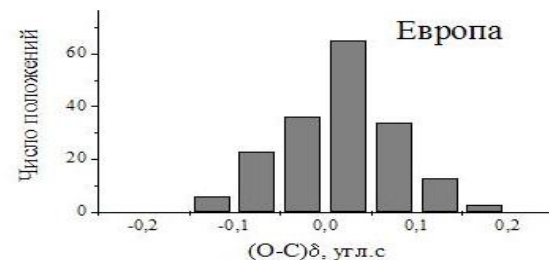
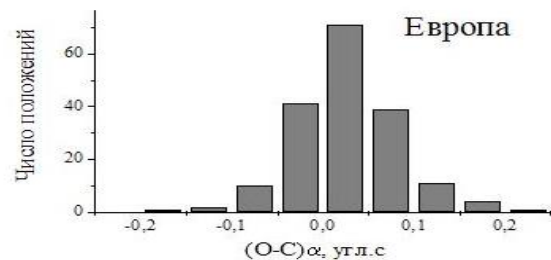
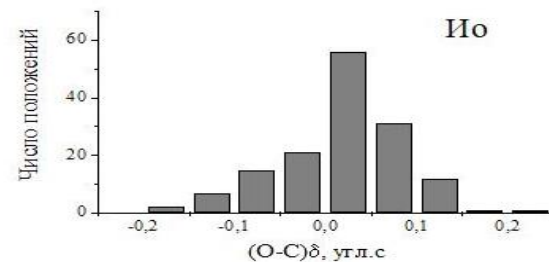
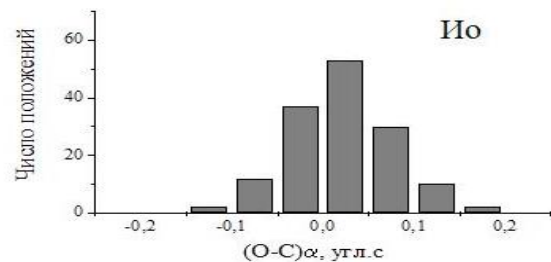
Спутник	N	(О-С) α				(О-С) δ			
		$\sigma_{\min}$	$\varepsilon_{\min}$	$\sigma_{\max}$	$\varepsilon_{\max}$	$\sigma_{\min}$	$\varepsilon_{\min}$	$\sigma_{\max}$	$\varepsilon_{\max}$
Ио	101	0.071	0.008	0.104	0.010	0.064	0.006	0.068	0.007
Европа	104	0.078	0.004	0.082	0.008	0.073	0.007	0.077	0.008
Ганимед	131	0.067	0.006	0.128	0.011	0.067	0.006	0.093	0.008
Каллисто	119	0.068	0.006	0.163	0.015	0.070	0.006	0.071	0.006

Самые большие интервалы среднеквадратических отклонений ($\sigma_{\min}$, $\sigma_{\max}$) для среднеарифметических величин (О-С) были получены для **Каллисто** по обеим координатам.

Наибольшими получились среднеквадратические отклонения для **Каллисто** по прямому восхождению и для **Ганимеда** по склонению

Это хорошо согласуется с ранее полученными нами результатами.

Рис.1. Рисунок демонстрирует распределение разностей (O-C), соответствующее нормальному закону для всех Галилеевых спутников, кроме Ганимеда по склонению. Это хорошо согласуется с предыдущими результатами.



Близость галилеевых спутников к Юпитеру создает непростую проблему при измерении **их** цифровых изображений - учет ореола планеты. Чтобы проверить, насколько эффективно он был учтен, построены графики

поведения разностей **(O-C)** по прямому восхождению и склонению в зависимости от видимого углового расстояния **(S)** между Юпитером и Галилеевыми спутниками на **рис.2а,2б**. Сплошной линией обозначено среднее значение **(O-C)** за весь период наблюдений.

У Ганимеда по склонению наблюдается увеличение ошибок, как мы уже отмечали ранее. Довольно большой разброс точек при малых **S** (**$S < 50''$**) вполне закономерен.

Здесь влияние ореола делает изображение спутника передержанным. В результате сильно растут систематические ошибки определения координат.

Рис. 2а. Поведение разностей (О-С) по прямому восхождению и склонению в зависимости от видимого углового расстояния между Юпитером и галилеевыми спутниками (S), комбинация теорий: EPM2015+V.Laineu-V.2.0|V1.1. Для каждого положения приведены ошибки среднего.

Сезон 2016-17 гг.

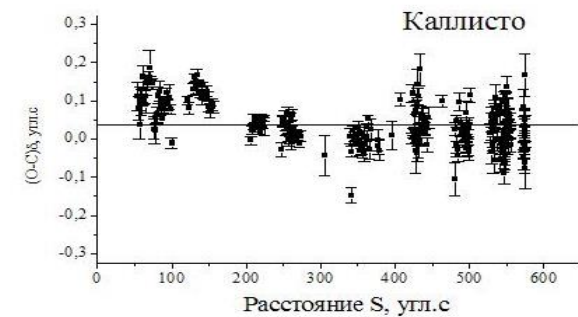
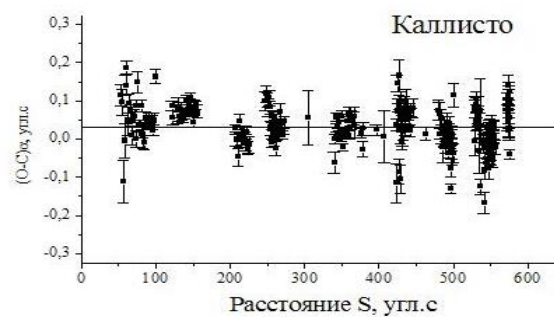
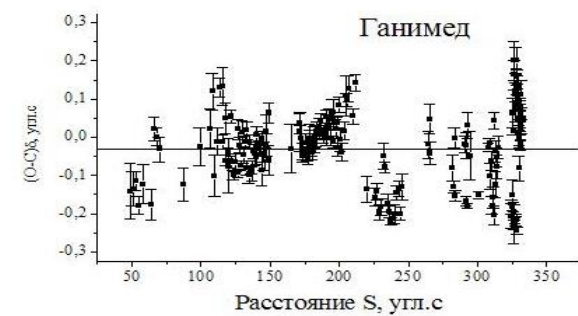
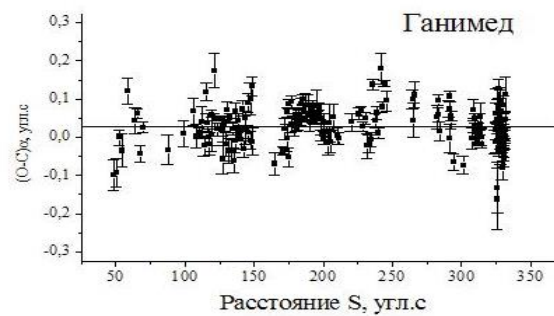
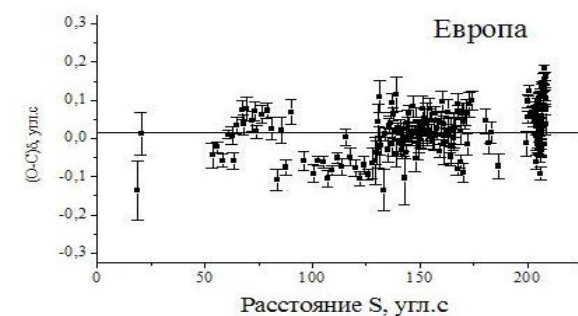
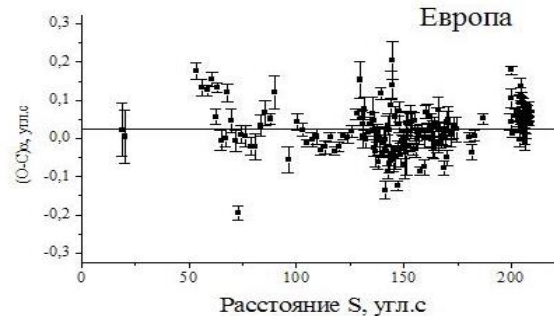
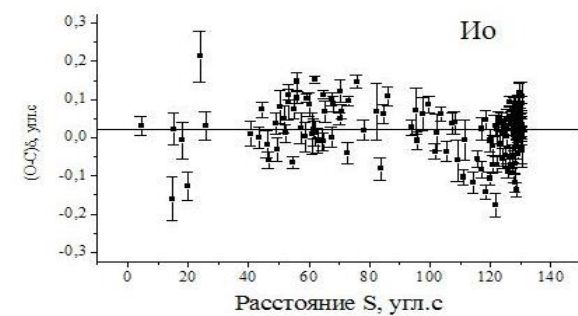
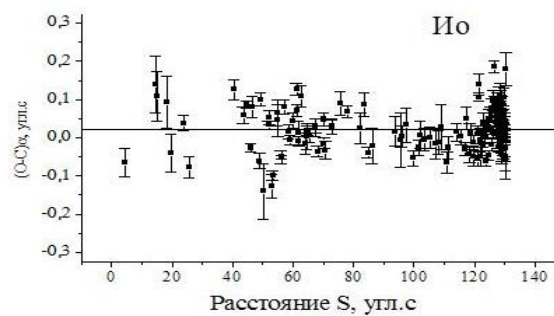
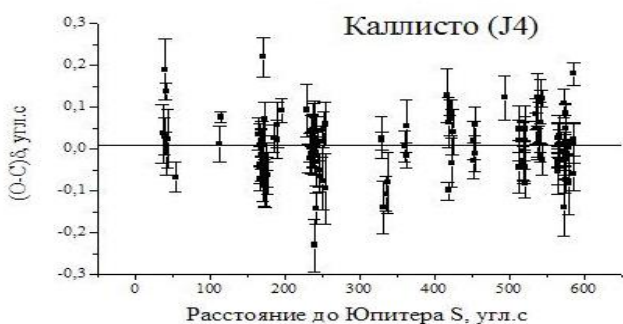
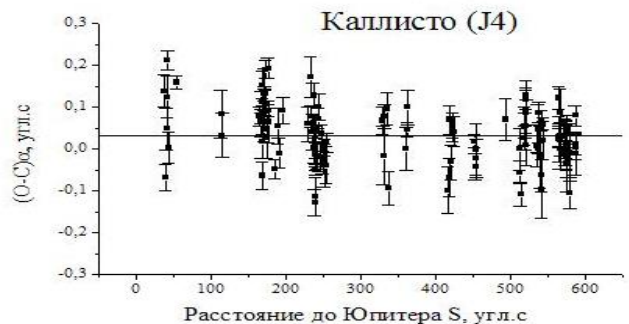
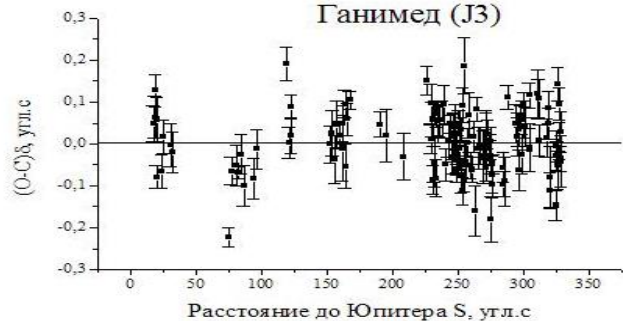
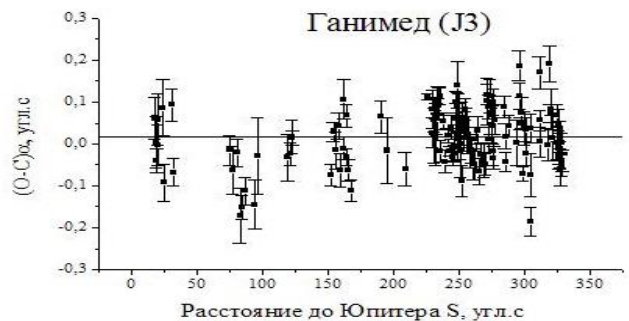
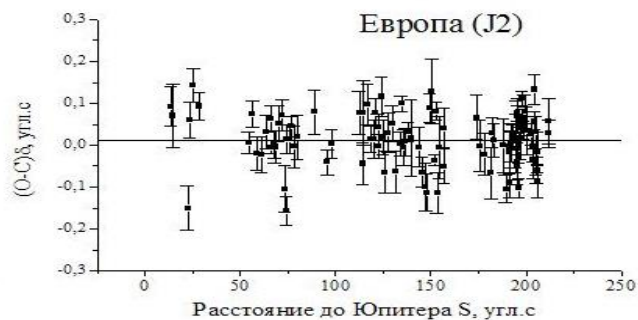
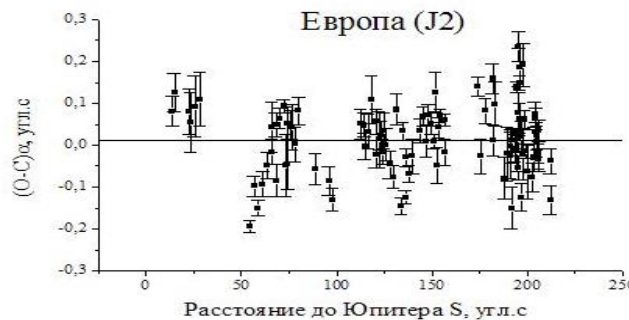
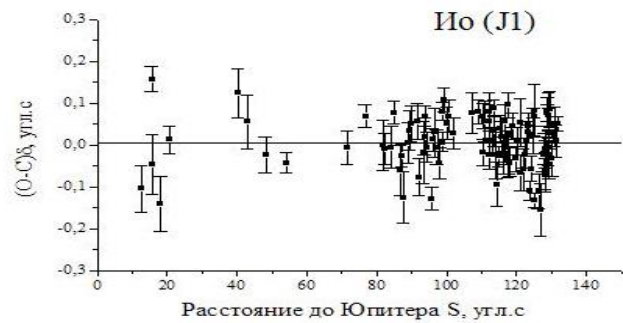
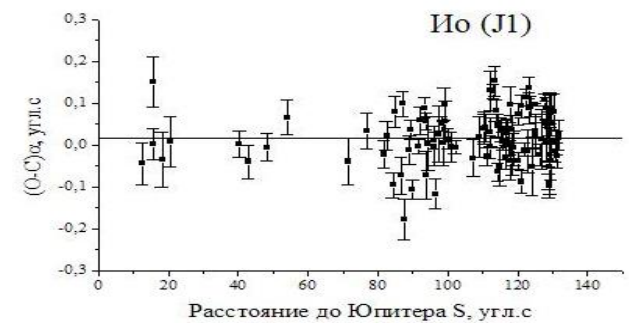


Рис. 26. (2018 г)
Большой раз-
брос точек при
малых S ($< 50''$)

Можно
предположить
наличие слабых
трендов у Ио и
Европы в
(O-C) по склоне-
нию. Но они
слабо кор-
релируют между
собой при оди-
наковых S . Все
укладывается в
сотые доли
угловой секунды



Исходя из данных **рис. 2а,2б**, можно предположить наличие слабых трендов в положениях Ио и Европы в (О-С) по склонению. Но эти тренды слабо коррелируют между собой при одинаковых **S**. Значит, преждевременно делать вывод о том, что они связаны с засветкой от Юпитера. Вполне возможно, что это проявление иного типа систематических ошибок.

Используя Службу естественных спутников планет “MULTI-SAT” и полученные нами экваториальные координаты галилеевых спутников, были получены дифференциальные координаты спутников относительно друг друга.

Таб. 5а. Средние значения (О-С) с их ошибками (**сезон 2016-17**)

Наблюдения	(О-С) α угл.с	(О-С) δ угл.с	ε_{α} угл.с	ε_{δ} угл.с	σ_{α} угл.с	σ_{δ} угл.с	N
Галилеевы спутники (α, δ)	0.0276	0.0132	0.0020	0.0027	0.0546	0.0757	761
($J_i - J_j$): $\Delta\alpha \cdot \cos\delta, \Delta\delta$	-0.0062	0.0021	0.0020	0.0027	0.0572	0.0801	854

Таб. 5б. Средние значения (О-С) с их ошибками (**сезон 2018**)

Наблюдения	(О-С) α угл.с	(О-С) δ угл.с	ε_{α} угл.с	ε_{δ} угл.с	σ_{α} угл.с	σ_{δ} угл.с	N
Галилевы спутники (α, δ)	0.0082	0.0086	0.0027	0.0025	0.0573	0.0534	455
($J_i - J_j$): $\Delta\alpha \cdot \cos\delta, \Delta\delta$	-0.0084	0.0097	0.0022	0.0019	0.0575	0.0493	671

В **2016-17гг** величины средних значений **(О-С)** дифференциальных координат спутников получились почти на порядок меньше, чем для экваториальных координат Галилеевых спутников. В **2018 г** согласование между результатами очень хорошее по обеим координатам.

Возможно, это связано с традиционной для подобного вида наблюдений проблемой, часто называемой астрометристами **“уравнением блеска”**. Ведь параметры привязки к опорной системе определяются по сравнительно слабым звездам **Gaia DR1**, а сами спутники Юпитера — объекты довольно яркие. Количество же опорных звезд на кадре во втором сезоне было значительно больше.

Различные эксперименты по оценке эффекта уравнения блеска хорошо работают в отдельные ночи, но приводят к заметному ухудшению сходимости в другие.

По этому разности координат вида **“спутник — спутник”** скорее всего более информативны для совершенствования теорий движения спутников Юпитера.

Вычисленные по нашим исследованиям разности **(O-C)** являются хорошим материалом для оценки точности полученных результатов.

Длительные во времени ряды наблюдений позволяют получить представление о **долговременной** эволюции орбит, а также изучить и оценить динамические эффекты определяющих этот процесс (такие как приливная диссипация и резонансы).

Заключение

По всем проведенным нами исследованиям полученных результатов наблюдается их хорошее согласие с наиболее современными теориями движения.

Работа выполнена при поддержке
программы Президиума РАН № 7.

Спасибо за внимание !



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!