

Результаты обработки наблюдений лазерной локации Луны 1970–2017 гг.

(по мотивам статьи, поданной в сборник трудов
Всероссийской астрометрической конференции «Пулково-2018»)

Дмитрий Алексеевич Павлов
Лаборатория эфемеридной астрономии, ИПА РАН
dpavlov@iaaras.ru

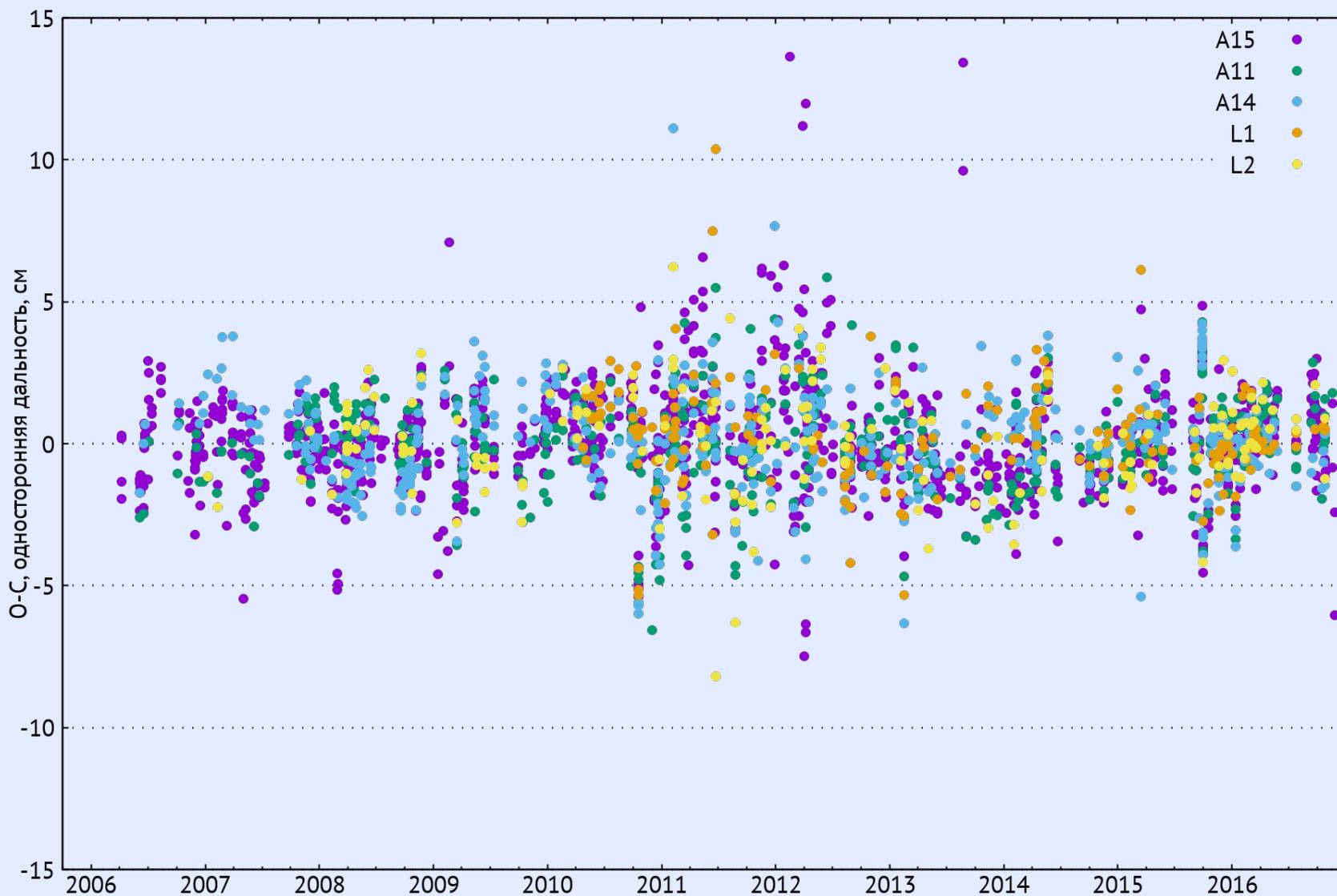


Научный семинар ИПА РАН
12.12.2018

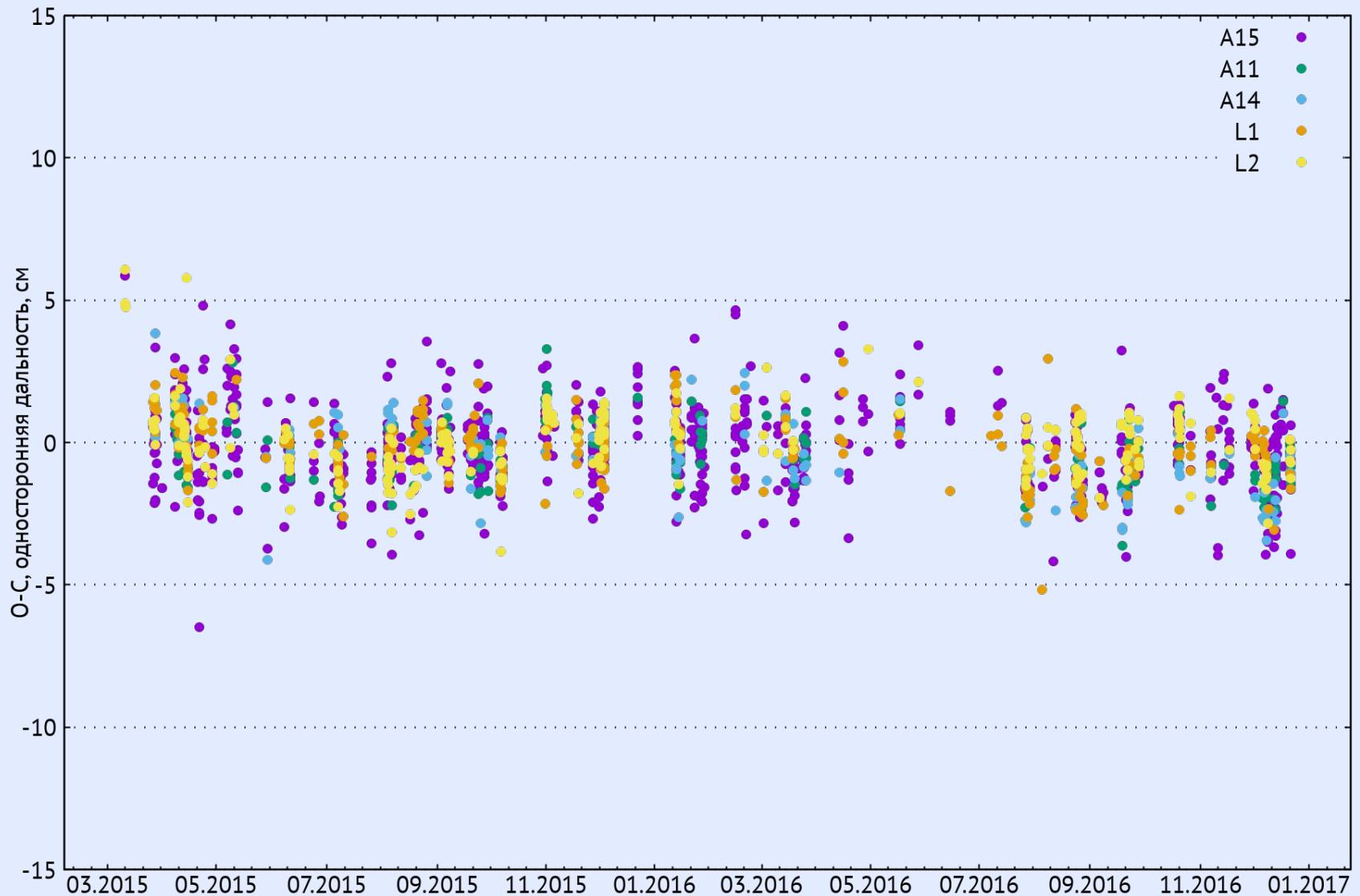
Содержание

1. Результаты обработки LLR-наблюдений
2. Попытки улучшения модели:
 - Солнечное давление
 - Взаимодействие фигур Земли и Луны
 - Наклон жидкого ядра
3. Определение параметров небесного полюса

Остаточные разности Apache Point

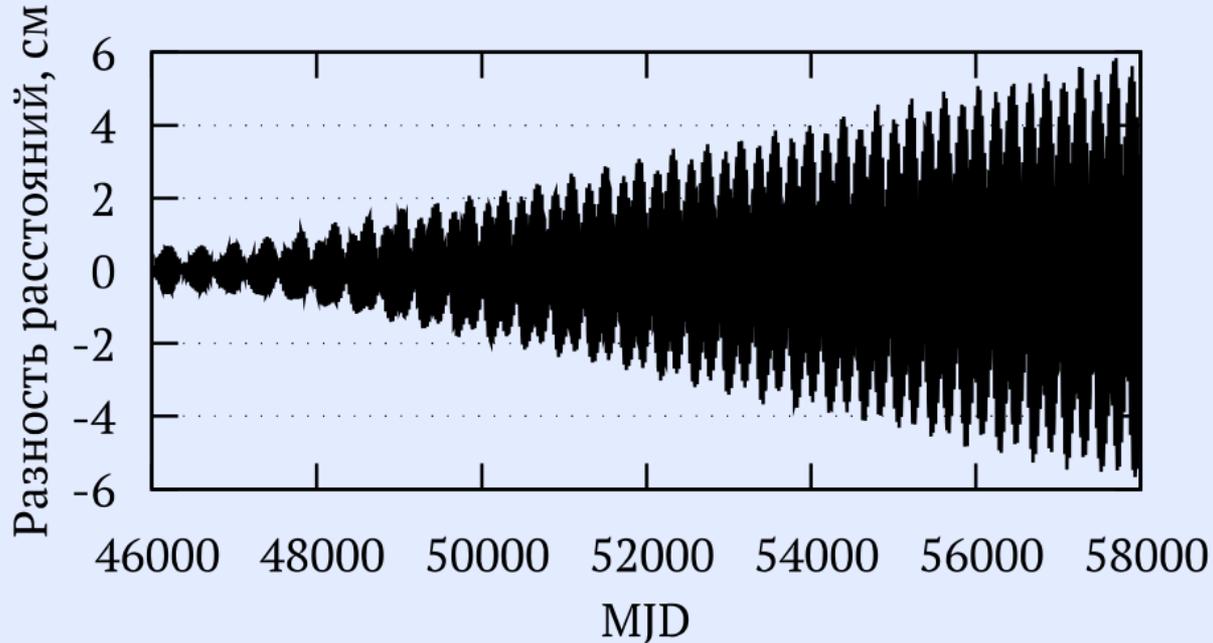


Остаточные разности CERGA (IR)



Солнечное давление на поверхность Луны

$$\mathbf{a}_{\text{rad}} = \frac{G_{\text{SC}}}{c} \frac{\pi R^2}{M} \hat{\mathbf{r}}_{\text{SM}} \approx 5.86 \times 10^{-16} \hat{\mathbf{r}}_{\text{SM}} \text{ м/с}^2$$



Статистика представления наблюдений

Станция	Период	Наблюдений	Использовано	Отброшено	WRMS A/B, см
McDonald	1970-1985	3604	3552	52	19.9
КрАО	1982-1984	177	177	0	58.9
MLRS1	1983-1988	631	587	44	11.1
MLRS2	1988-2015	3670	3216	454	3.5
Haleakala	1984-1990	770	749	21	5.8
OCA (Ruby)	1984-1986	1188	1109	79	17.0
OCA (YAG)	1987-2005	8324	8207	117	2.0
OCA (MeO)	2009-2017	1836	1814	22	1.43/1.42
OCA (IR)	2015-2017	2840	2797	43	1.30/1.29
APO	2006-2016	2648	2609	39	1.39/1.38
Matera	2003-2017	151	143	8	3.0

(A = без солнечного давления, B = с солнечным давлением)

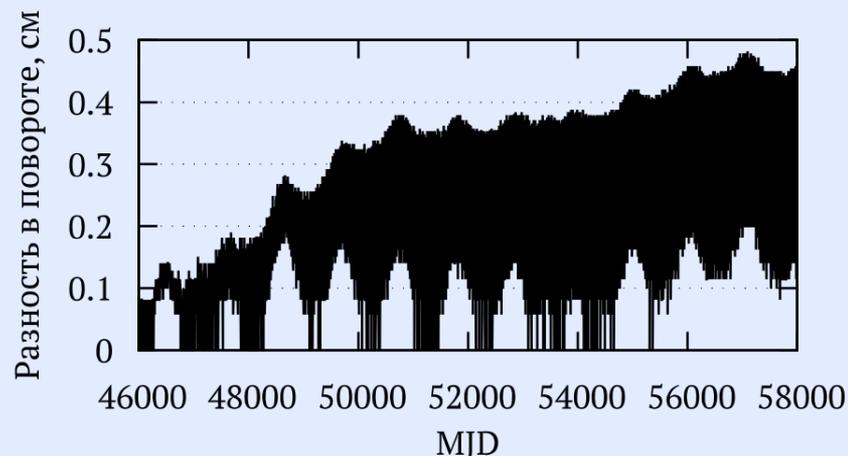
Взаимодействие фигур Земли и Луны

В основной модели Луны в EPM:

- Взаимодействия материальных точек (E-I-H)
- Ускорения тел в несферическом потенциале Солнца (J2), Луны и Земли (до 6-го порядка)
- Момент, сообщаемый Луне материальными точками в её поле (6-го порядка)
- Момент, сообщаемый Луне несферическим потенциалом Земли (E2-M2)

В рабочей версии с использованием формул из ([Hofmann, Müller, 2018](#)):

- Момент E2-M3 (см. рисунок)
- Момент E2-M4 и выше (мизерный эффект)
- Ускорение E2-M3 и выше (мизерный эффект)



Главные оси инерции Луны и GRAIL

- Динамические уравнения вращения Луны построены на главных осях
 - Нулевые (в среднем) недиагональные элементы тензора инерции
 - Нулевые (в среднем) C_{21} , S_{21} , S_{22}
 - Предполагается совпадение главных осей всей Луны и коры
- Главная проблема в определении жидкого ядра Луны – отделение долгопериодических приливных эффектов от внутренних

GRAIL – космический гравиметр (пара спутников), измеривший гравитационное поле Луны в 2012 г.

- Орбиты GRAIL уточнялись радиотехническими наблюдениями с Земли (но не по самим гравиметрическим измерениям)
- Кроме статического поля, уточнены параметры модели вариаций (другой, нежели используется в динамике самой Луны)

GRAIL и динамика Луны

Решение	Институт	Эфемерида	C21	S21	S22
GL0660b	JPL	DE421	0.123e-9	0.101e-8	-0.249e-9
GRGM900c	GSFC	DE421	0.223e-9	0.101e-8	-0.105e-9
GRGM1200a	GSFC	DE430	0.147e-10	0.117e-8	0.908e-9
GL1500e	JPL	DE430	0.173e-9	0.104e-8	-0.102e-9

ЕРМ (ИПА РАН): при введении поправки S21 в LLR-решение определяется значение $S21 = \mathbf{0.08475e-8}$ ($3\sigma = 0.018e-8$)

Вывод: модель Луны имеет неучтённый эффект.
(GRAIL меряет истинное поле, но не привязывается к главным осям.)

Интерпретация ненулевого S21

Ненулевой S21 характеризует рассогласование эфемеридной пары осей YZ с истинными главными осями инерции YZ.

Первое предположение: несовпадение осей ядра-эллипсоида и коры.

Внешний крутящий момент действует только на твёрдую оболочку, но не на жидкое ядро (Wu, Wahr, 1997)

$$\Gamma_f = \Gamma_0^f - \iint_{\text{cmb}} \mathbf{r} \times \hat{\mathbf{n}} P_1 ds + \iint_{\text{cmb}} \mathbf{r} \times \hat{\mathbf{n}} \rho_f \phi_e ds$$

$$= \Gamma_0^f - \iint_{\text{cmb}} \mathbf{r} \times \hat{\mathbf{n}} \rho_f (\phi - \chi) ds,$$

where Γ_0^f is the equilibrium torque [see (1)].

$$\Gamma_m = -\Gamma_0^f + \iint_{\text{cmb}} \mathbf{r} \times \hat{\mathbf{n}} P_1 ds + \Gamma_e - \iint_{\text{cmb}} \mathbf{r} \times \hat{\mathbf{n}} \rho_f \phi_e ds$$

$$= -\Gamma_0^f + \Gamma_e + \iint_{\text{cmb}} \mathbf{r} \times \hat{\mathbf{n}} \rho_f (\phi - \chi) ds.$$

Поворот ядра вокруг оси X изменил бы инерцию всей Луны, но не сказался бы на действии внешних моментов на твёрдую оболочку.

Это было бы идеальным устранением наблюдаемого рассогласования.

Интерпретация ненулевого S21: крушение надежд

- Поток (Пуанкаре) жидкости в эллипсоидной полости оказывает давление на стенки.
- При наклонённом ядре изменяется не только тензор инерции Луны, но и крутящий момент, который кора получает от давления
- Также на границе ядра и коры есть трение, но оно изменяется мало.

2.1 The pressure torque

The balance between the centrifugal and pressure forces gives the pressure p :

$$p = \frac{(B^2 + C^2)x^2 + (C^2 + A^2)y^2 + (A^2 + B^2)z^2}{2} - ABxy - ACzx - BCyz. \quad (6)$$

It does not change across the thin viscous boundary layer. The ellipticity enters the analysis only through the expression of $\hat{\mathbf{n}}$:

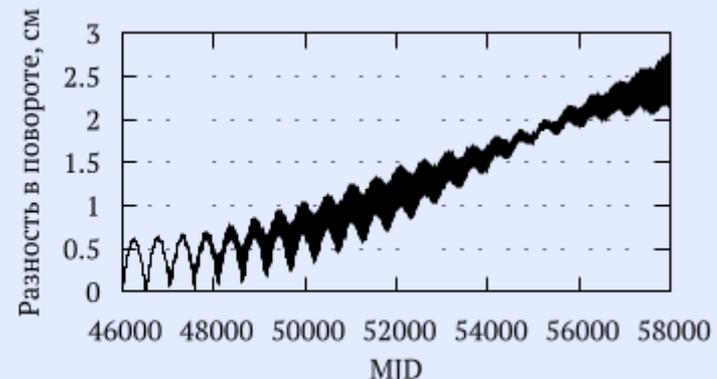
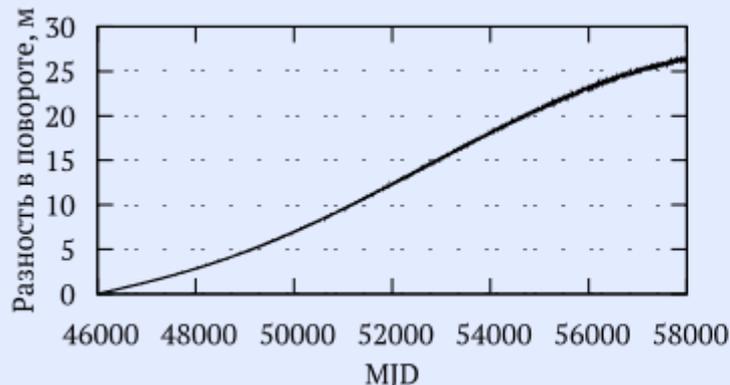
$$\hat{\mathbf{n}} = \mathbf{r} + 2\eta z \hat{\mathbf{e}}_z \quad (7)$$

Pressure stresses acting on the spheroidal boundary yield the pressure torque:

$$\Gamma_p = I\eta \begin{pmatrix} BC \\ -AC \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

(Noir et al, 2001)

Эффекты в движении Луны от изменения инерции и от изменения давления **взаимно компенсируются**.



Интерпретация ненулевого S_{21} : другие пути

- Причина не в ядре, а в неучтённых приливных эффектах?
 - В настоящий момент в динамической модели не учтены приливы от Солнца
 - Никем не проводились эксперименты по применению моделей приливов, использующихся для динамики КА, к динамике Луны
- Модель потока Пуанкаре недостаточно точно описывает механику процессов, происходящих в ядре и на границе между ядром и твёрдой оболочкой?
 - Других моделей автору найти не удалось

Небесный полюс и эклиптика

- Орбиты планет и Луны в НСК в данный момент уточняются независимо:
 - Орбита Луны определяется в экваториальной НСК, к которой через IERS EOP (т.е. фактически через РСДБ) привязаны LLR-наблюдения.
 - Орбиты планет (включая Землю) ориентируются в НСК по данным прохождения КА в дальнем космосе на фоне квазаров с точностью около 0.2 mas ([Pitjeva, 2017](#))
- Наблюдения квазаров очень чувствительны к экватору, но в меньшей степени к эклиптике (через годичную аберрацию и прецессию).
 - Попытка определить орбиту Земли по РСДБ-наблюдениям показала точность в сотни метров ([Курдубов, Миронова, Павлов, неизданное](#))
- Наблюдения КА (РСДБ + дальность) очень чувствительны к эклиптике, но в меньшей степени к экватору
- Наблюдения лазерной локации Луны чувствительны и к экватору, и к эклиптике ([Williams, 2018](#))

Определение небесного полюса по LLR

Введены дополнительные параметры вращения координат станций в НСК по осям X и Y, и их тренды.

Результат:

- Определены поправки к положению небесного полюса с точностью около 0.2 mas (3σ)
 - В планетном решении аналогичные углы определяются по РСДБ КА, и на них доворачивается вся Солнечная система (BCRF к ICRF)
- Обнаружено вращение вокруг оси X: -0.037 ± 0.013 (3σ) mas/год. Интерпретация неясная.
 - Галактическая абберация? Слишком большое значение
 - Несмоделированный эффект в наклоне эклиптики к экватору?
 - Ошибочная модель Солнца при вычислении ускорения от J2_☉?

Выводы

- Учёт солнечного давления приводит к небольшому улучшению при обработке наблюдений
- Учёт взаимодействия фигур степени выше 2 не оказывает эффекта
- Модификация модели ядра Луны путём поворота его формы в мантии не даёт ожидаемого устранения артефакта модели в виде ненулевого значения S_{21} . Требуется усложнение либо модели приливов (например, учёт приливов от Солнца), либо модели вращающейся жидкости в несферической оболочке.
- Необходимо использовать наблюдения LLR при определении ориентации эфемерид относительно ICRF
- Требуется объяснение обнаруженного вращения эфемерид относительно ICRF (возможно требует улучшения модель Солнца)

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ