

# Анализ уточнённой лунной части эфемерид ЕРМ

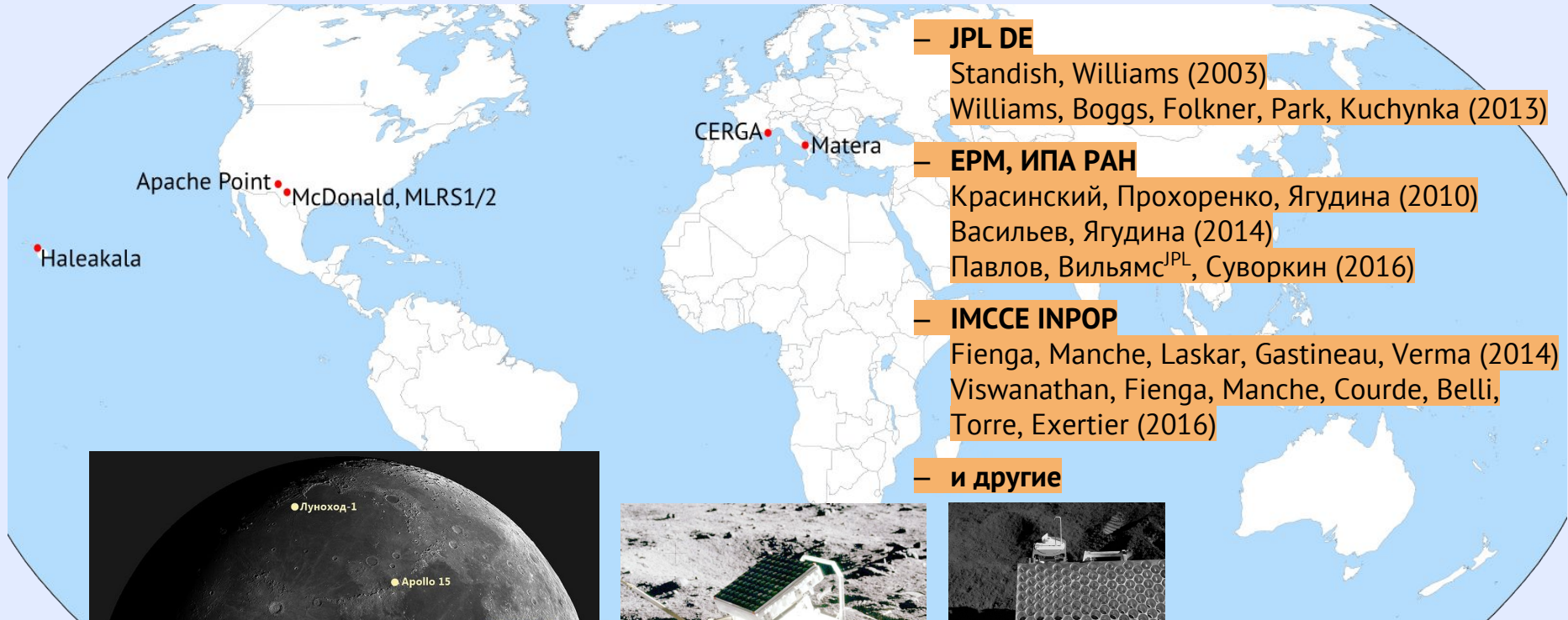
---

Д. А. Павлов, Э. И. Ягудина

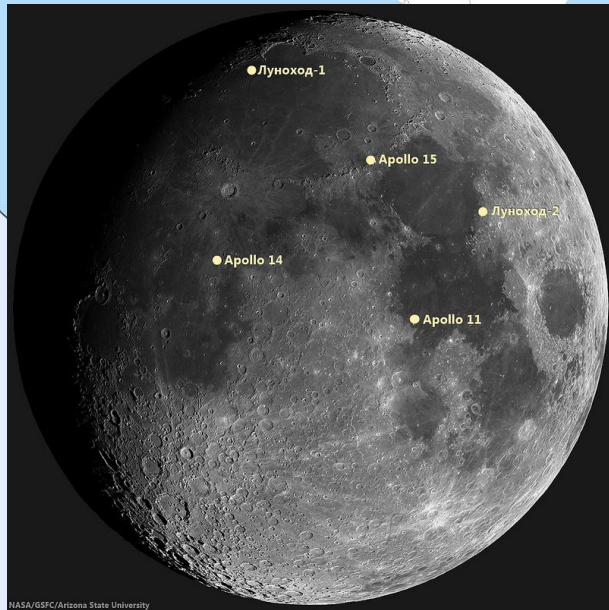
*Институт прикладной астрономии Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия*



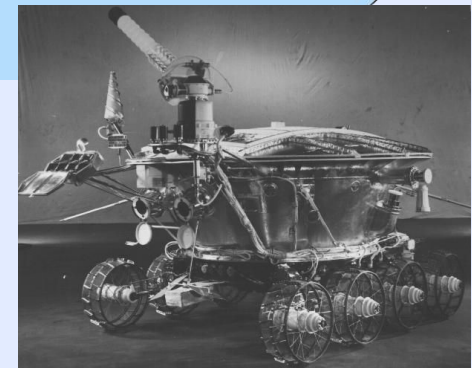
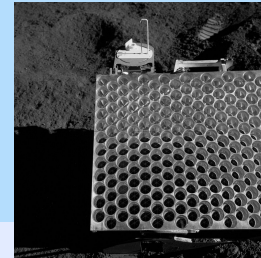
# Лунная лазерная локация и эфемериды



- **JPL DE**  
Standish, Williams (2003)  
Williams, Boggs, Folkner, Park, Kuchynka (2013)
- **ЕРМ, ИПА РАН**  
Красинский, Прохоренко, Ягудина (2010)  
Васильев, Ягудина (2014)  
Павлов, Вильямс<sup>JPL</sup>, Суворкин (2016)
- **IMCCE INROP**  
Fienga, Manche, Laskar, Gastineau, Verma (2014)  
Viswanathan, Fienga, Manche, Courde, Belli, Torre, Exertier (2016)
- **и другие**



NASA/GSFC/Arizona State University



# Модель орбитального движения Луны

- Релятивистские уравнения движения материальных точек (EIN).
- Возмущения в гравитационном поле Земли. Используется модель на базе решения **EGM2008**, рекомендованная IERS2010, с коэффициентами до 6-й степени.
- Ускорение Земли в гравитационном поле Луны. Используется решение **GL660b** (результат эксперимента GRAIL) с корректировками.
- Ускорение от Земли, Солнца, Венеры, Марса и Юпитера в гравитационном поле Луны.
- Возмущения орбиты Луны от твердотельных и океанических приливов от Солнца и Луны на Земле:
  - Модель IERS2010: вариации геопотенциала
  - Модель DE430: ускорение с задержками по вращению и орбите

# Модель физической либрации Луны

## Твёрдая Луна

- Уравнения для эйлеровых углов либрации с наличием внешнего крутящего момента
- Момент от материальных точек Земли, Солнца, Венеры, Меркурия, Марса, Юпитера в гравитационном поле Луны
- Момент от взаимодействия фигуры Земли (только  $J_2$ ) с гравитационным полем Луны

## Эластичная Луна

- Динамическая матрица инерции с учётом приливной и вращательной деформаций (с задержкой  $t$ )
- Динамические коэффициенты гравитационного потенциала

## Луна с жидким ядром

- Уравнения вращения ядра в системе координат коры
- Вклад ядра в матрицу инерции
- Момент, сообщаемый коре трением на границе с ядром
- Момент, сообщаемый коре из-за сплюснутости ядра

# Редукции LLR-наблюдений

- Итерационное решение уравнения для определения времени отражения луча;
- Учёт релятивистской задержки сигнала (Копейкин, 1990);
- Учёт тропосферной задержки (Mendes, Pavlis, 2004);
- Преобразование UTC к динамическому времени TDB, интегрируемому совместно с эфемеридами EPM;
- Немоделируемые сдвиги, перевзвешивание.
- Преобразование CRS → TRS с моделью IAU2000/2006 и поправками к ПВЗ IERS C04;
- Смещение станции из-за твердотельных (Dehant, Matthews, 2000), океанических (FES2012) и полюсных приливов;
- Релятивистское преобразование положений станции и отражателя в BCRS;
- Лунные твердотельные приливы от Земли и Солнца.

# Немоделируемые эффекты

## Либрация в долготе

$$\Delta\lambda = A_1 \cos l' + A_2 \cos(2l - 2D) + A_3 \cos(2F - 2L)$$

$l'$  – средняя аномалия Солнца,  $l$  – средняя аномалия Луны,  $D$  – средняя солнечная элонгация Луны,  $F$  – аргумент широты.

## Компенсация эффектов в структуре Луны

C32, S32, C33 – уточняются, вместо заимствования из GL660b.

C21, S21, S22 – равны нулю в модели (ненулевые в GL660b).

## Сдвиги нормальных точек

Определяются 25 сдвигов для длительных периодов наблюдений.

Сдвигов нет в CERGA после 2005 г. и в Apache Point после 2013 г.

# Уточняемые параметры

## Начальные параметры (15)

- Положение и скорость Луны ( $x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ )
- Начальные углы либрации ( $\varphi, \theta, \psi$ ) и скорости их изменения
- Угловая скорость жидкого ядра ( $\omega_c$ )

## Динамические параметры (9)

- Сумма  $GM$  Земли и Луны
- Параметры инерции  $\beta = (C - A)/B, \gamma = (B - A)/C$
- Приливная задержка  $\tau$
- Коэффициенты гравитационного потенциала Луны  $C_{32}, S_{32}, C_{33}$
- Коэффициент сжатия жидкого ядра  $f_c$ , коэффициент трения  $K_v/C$

## Редукционные параметры (71)

- Положения 5 отражателей и 7 станций
- Скорости станций CERGA и McDonald/MLRS1/MLRS2
- $h_2$  Луны
- Амплитуды немоделируемых колебаний  $\psi$ :  $\cos l', \cos(2l-2D), \cos(2F-2l)$
- Сдвиги (25 шт.)



# Статистика представления наблюдений



Станция	Период	Норм. точек	использовано	отброшено	One-way wrms, см
McDonald	1970-1985	3604	3552	52	19.7
MLRS1	1983-1988	631	587	44	11.1
MLRS2	1988-2015	3670	3211	459	3.5
Haleakala	1984-1990	770	746	24	5.5
Cerga (Ruby)	1984-1986	1188	1109	79	16.9
Cerga (YAG)	1987-2005	8324	8218	106	2.0
Cerga (MeO)	2009-2016	1732	1713	19	1.4
Cerga (IR)	2015-2016	1626	1606	20	1.3
Apache Point	2006-2016	2648	2606	42	1.3
Matera	2003-2015	118	103	15	4.0

Источники наблюдений: <http://www.geoazur.fr/astrogeo/?href=observations/donnees/luneRG/brutes>,  
<http://polac.obspm.fr/llrdatae.html>, [http://physics.ucsd.edu/~tmurphy/apollo/norm\\_pts.html](http://physics.ucsd.edu/~tmurphy/apollo/norm_pts.html)



# Различные решения

Станция	One-way wrms, см			
	A	B	C	D
McDonald	<b>19.7</b>	20.1	19.7	19.7
MLRS1	<b>11.1</b>	11.7	11.1	11.1
MLRS2	<b>3.5</b>	3.9	3.5	3.5
Haleakala	<b>5.5</b>	5.9	5.7	5.5
Cerga (Ruby)	<b>16.9</b>	17.5	16.9	16.9
Cerga (YAG)	<b>2.0</b>	2.3	2.0	2.0
Cerga (MeO)	<b>1.41</b>	1.60	1.40	1.41
Cerga (IR)	<b>1.25</b>	1.29	1.28	1.25
Apache Point	<b>1.34</b>	1.66	1.43	1.34
Matera	<b>4.0</b>	4.0	4.0	4.0

**A** – основное решение

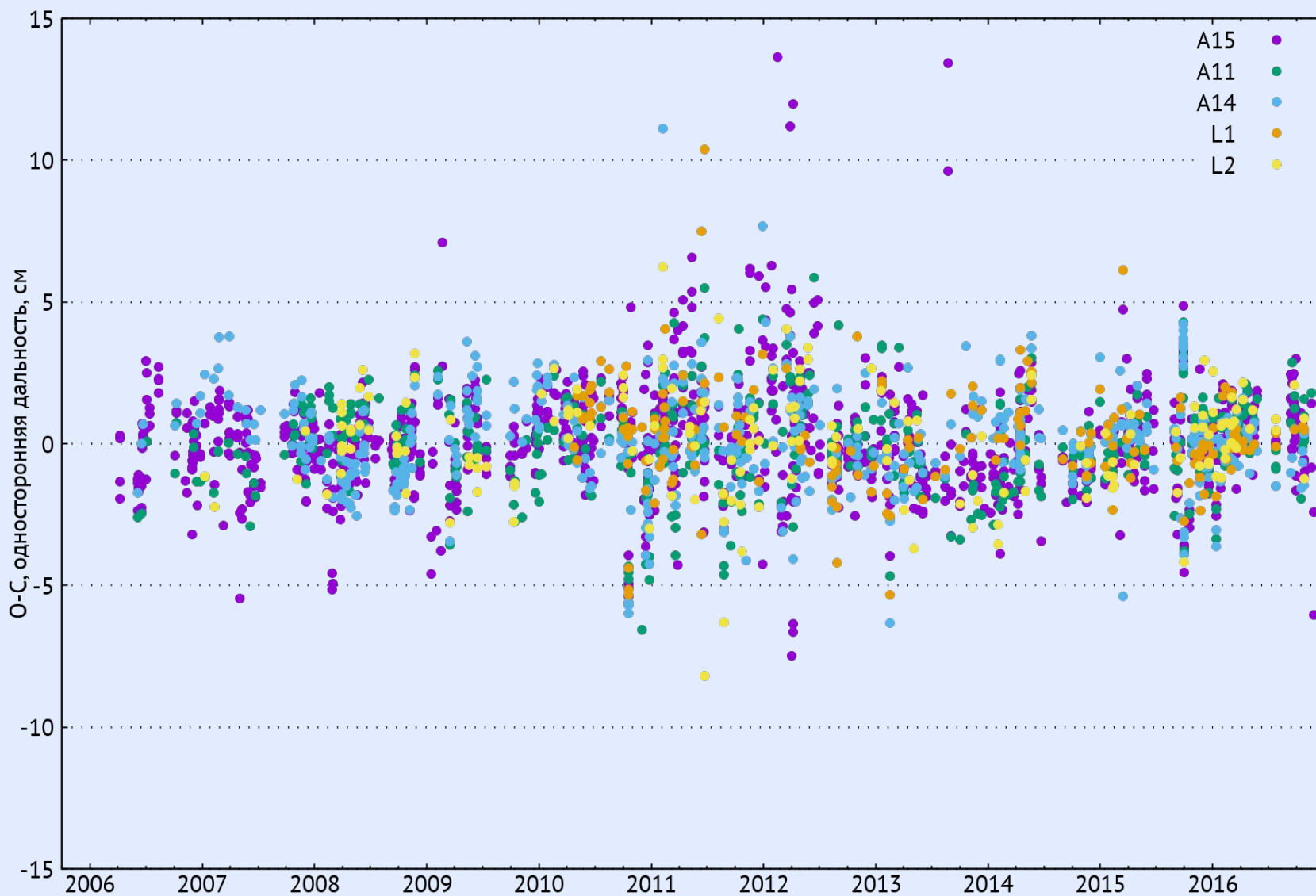
- приливные вариациями по модели DE430 (Williams and Boggs, 2016)
- океаническая нагрузка (FES2012; Petit and Luzum, 2010) и движение геоцентра
- атмосферная нагрузка (Petrov and Boy, 2004; GEOS-FPIT; <http://massloading.net>)

**B** – с приливными вариациями геопотенциала по модели IERS2010 (Petit and Luzum, 2010)

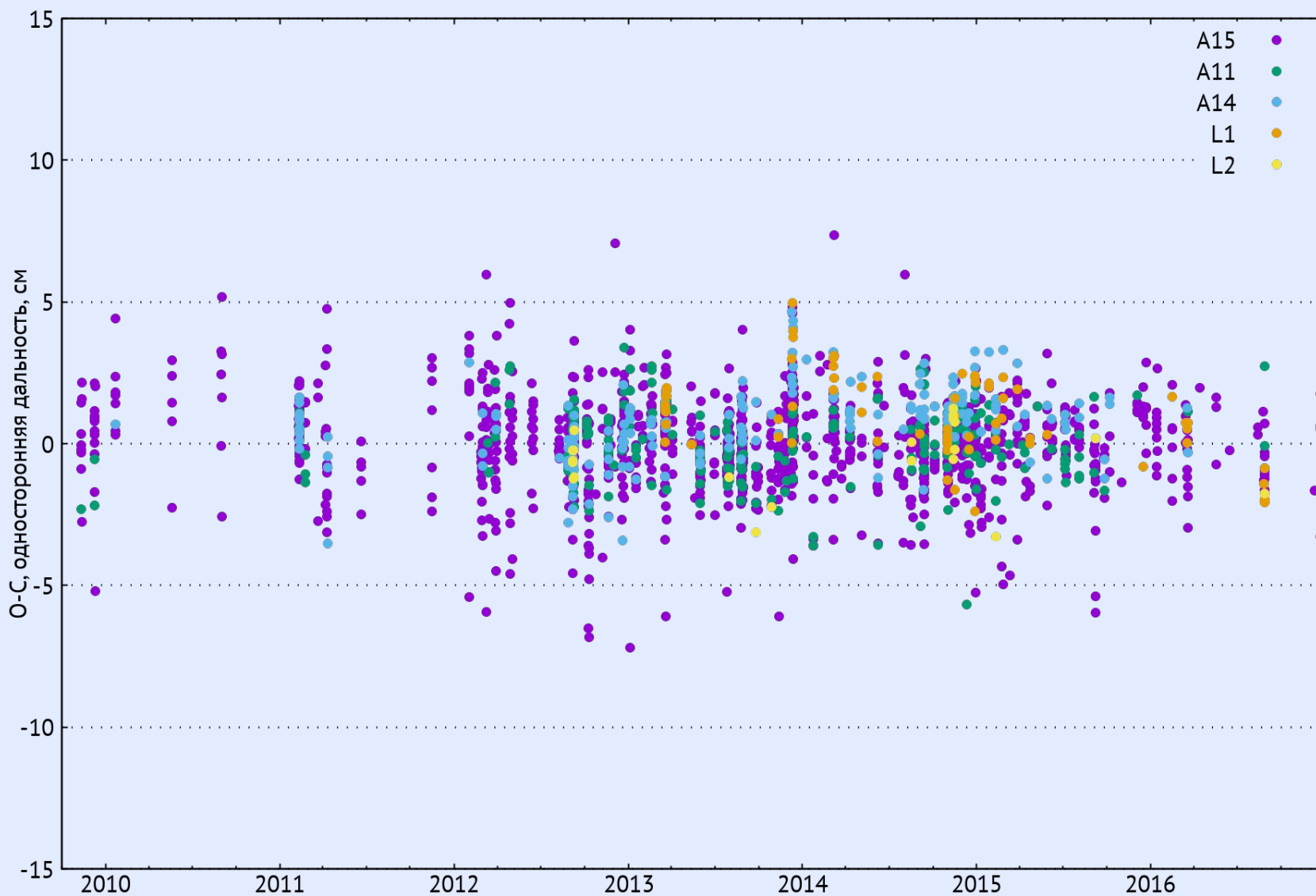
**C** – без океанической нагрузки

**D** – без атмосферной нагрузки (неотлично от A)

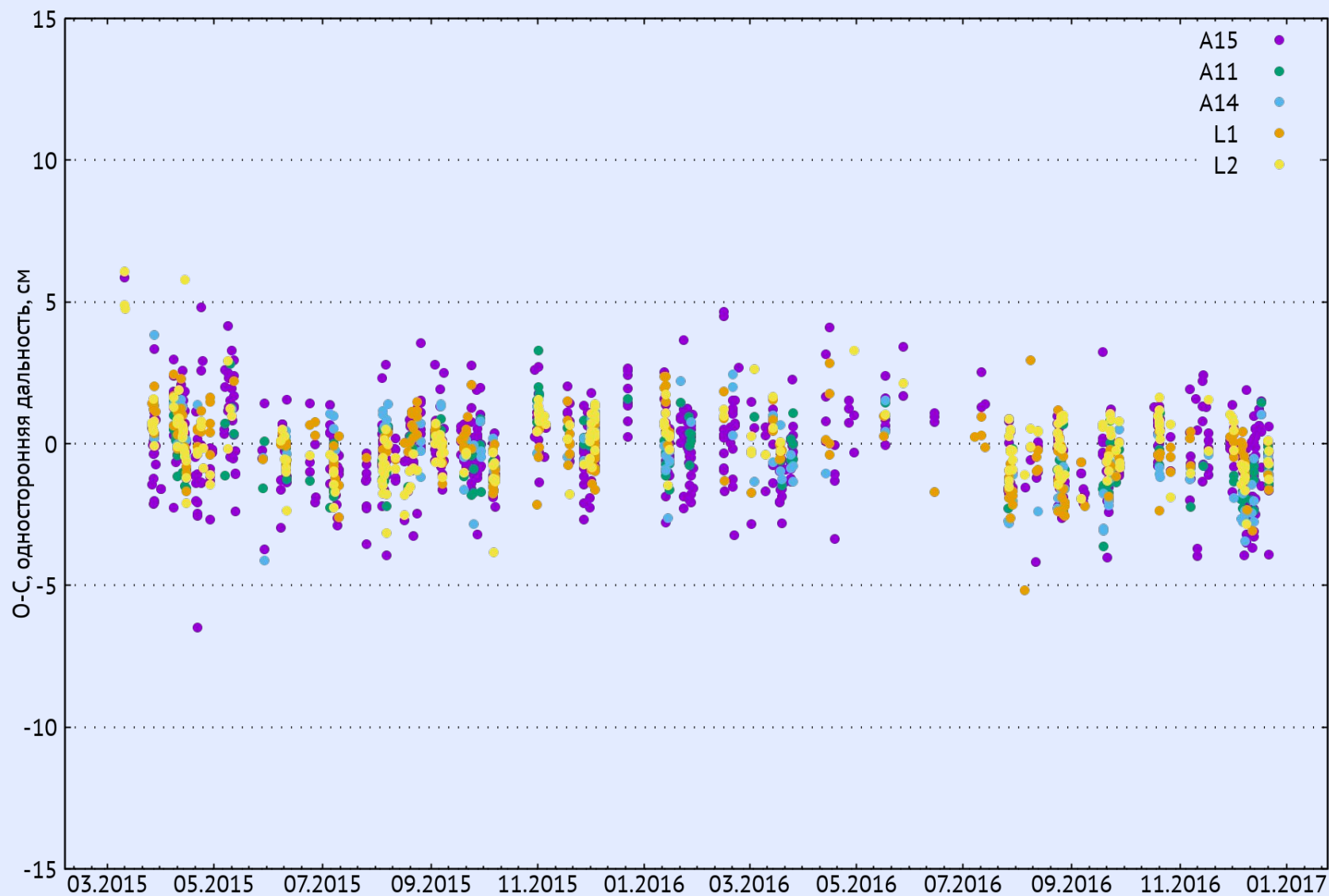
# Остаточные разности Apache Point



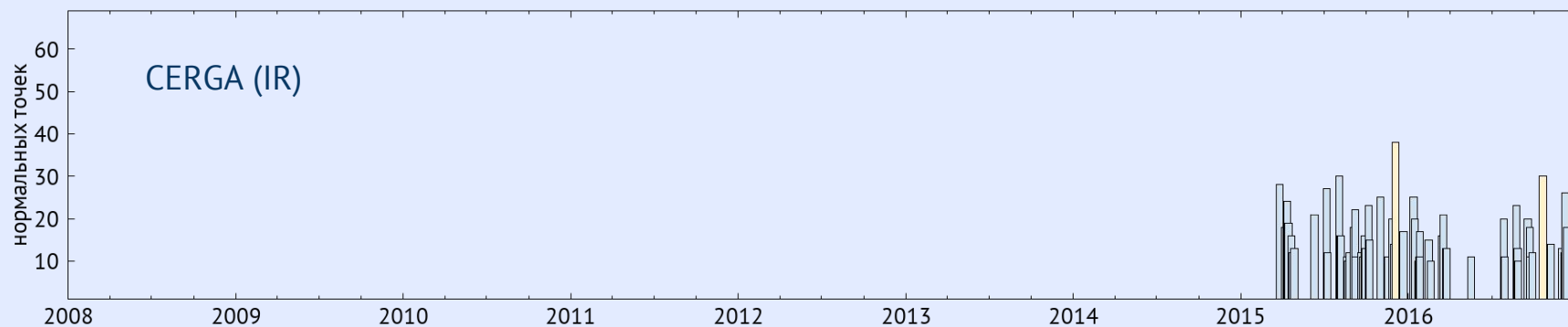
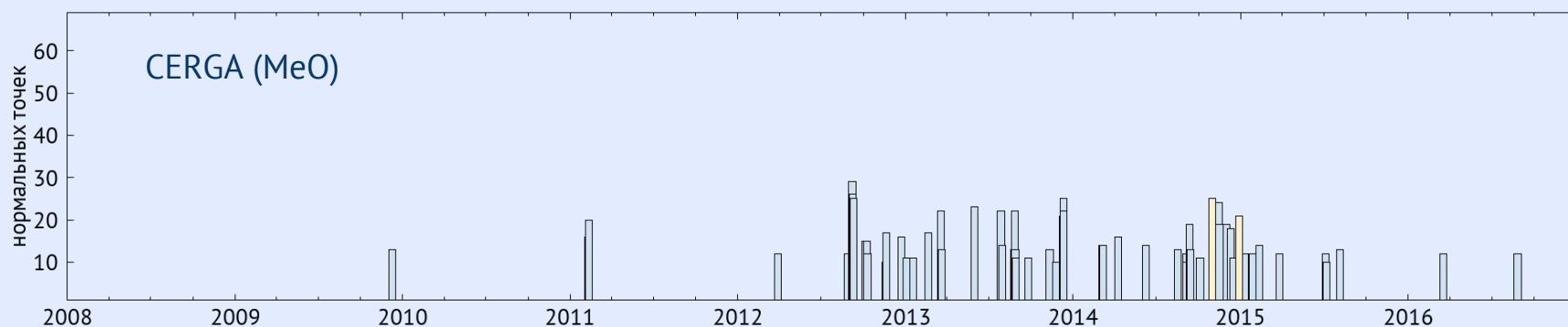
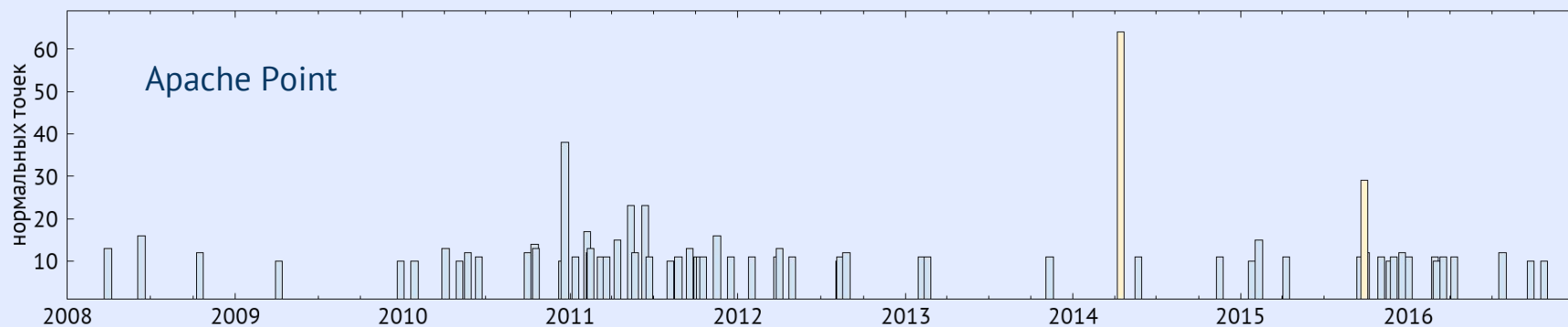
# Остаточные разности CERGA (MeO)



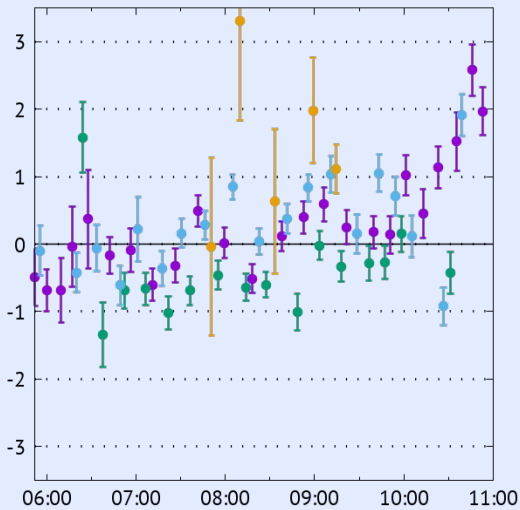
# Остаточные разности CERGA (IR)



# Сеансы с 10+ нормальными точками

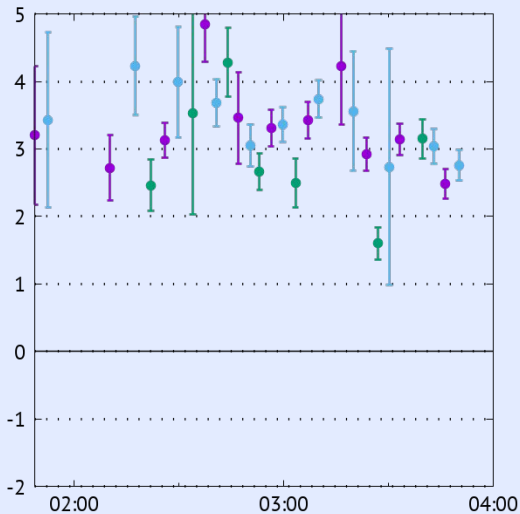
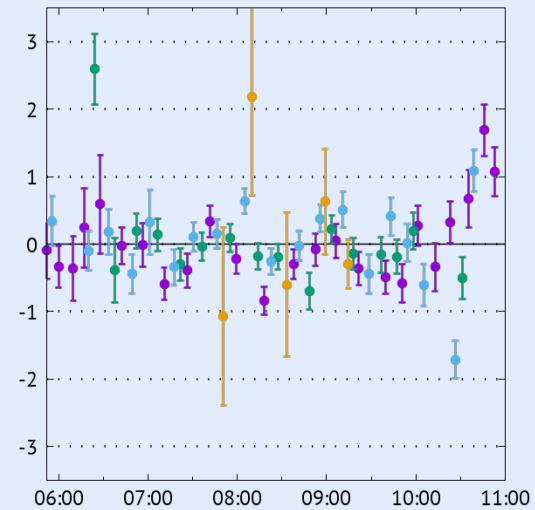


# Поправки к ПВЗ и ПВЛ по сеансам LLR



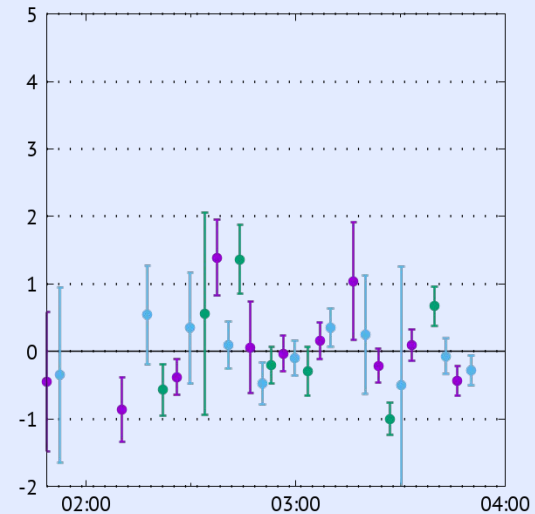
Apache Point 15.04.2014

$\Delta UT0$   $23 \pm 13$   $\mu\text{s}$   
 $VOL$   $-0.23 \pm 0.14$  mas  
 $\Delta\psi$   $-2.14 \pm 0.8$  mas  
 $rotY$   $-1.46 \pm 0.87$  mas

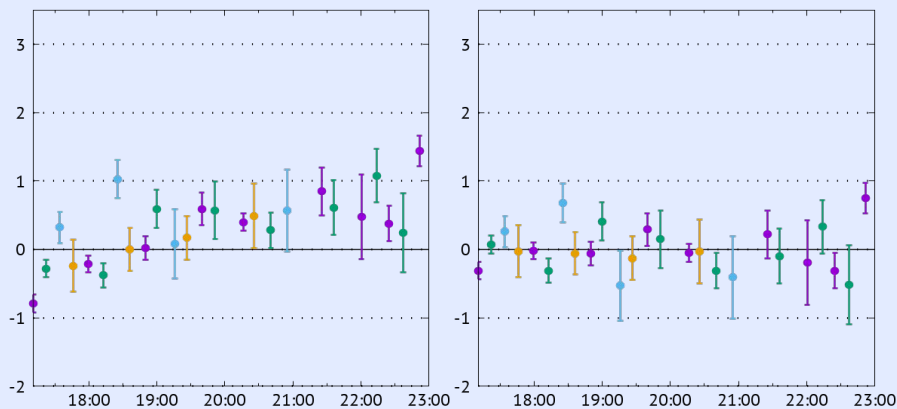


Apache Point 28.09.2015

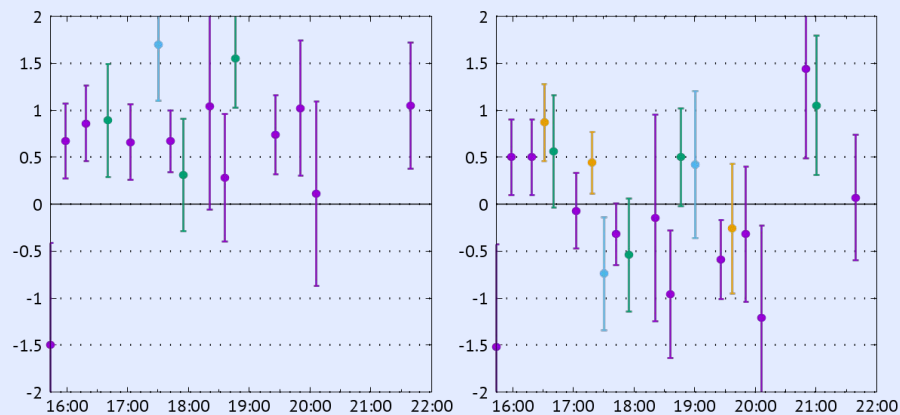
$\Delta UT0$   $110 \pm 28$   $\mu\text{s}$



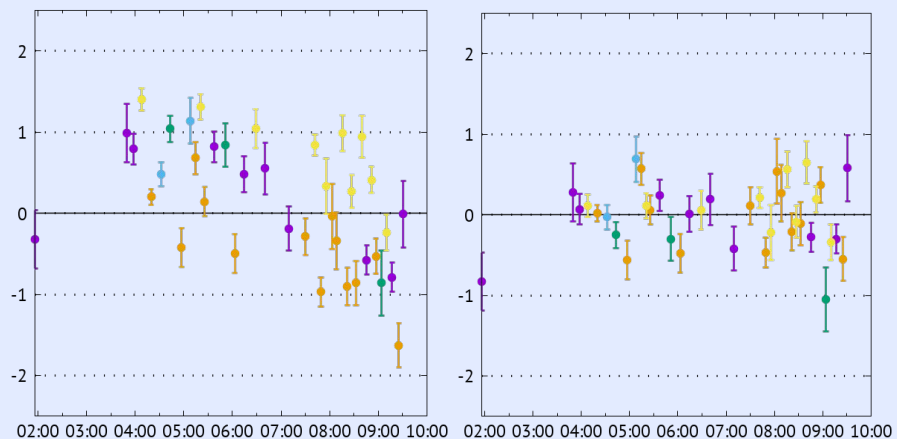
# Поправки к ПВЗ и ПВЛ по сеансам LLR (2)



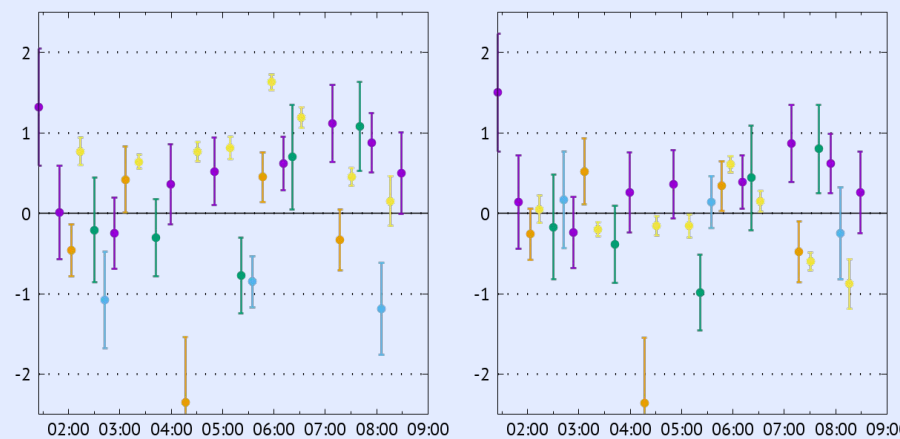
CERGA (MeO), 01.11.2014



CERGA (MeO), 29.12.2014



CERGA (IR), 04.12.2015



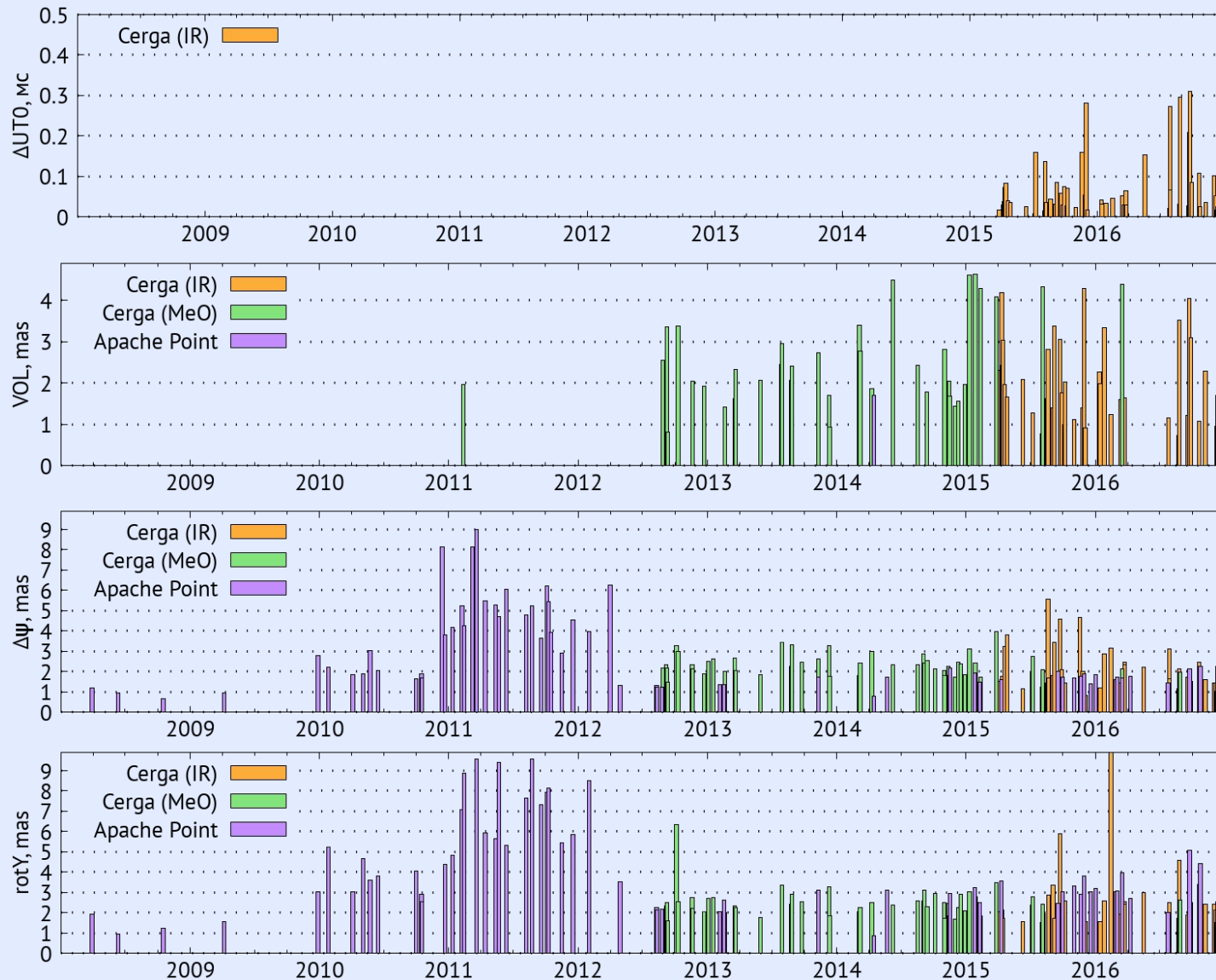
CERGA (IR), 21.10.2016



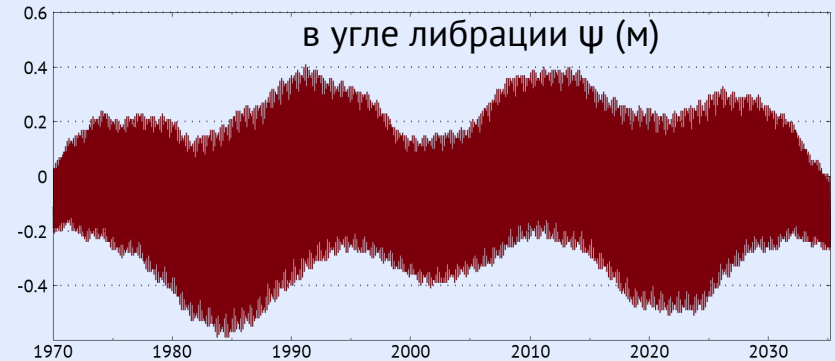
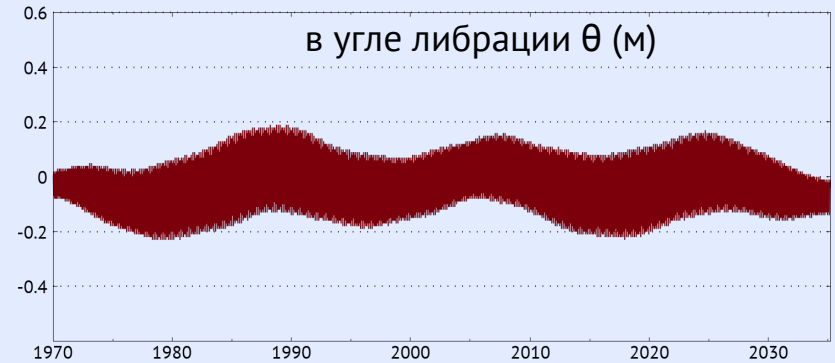
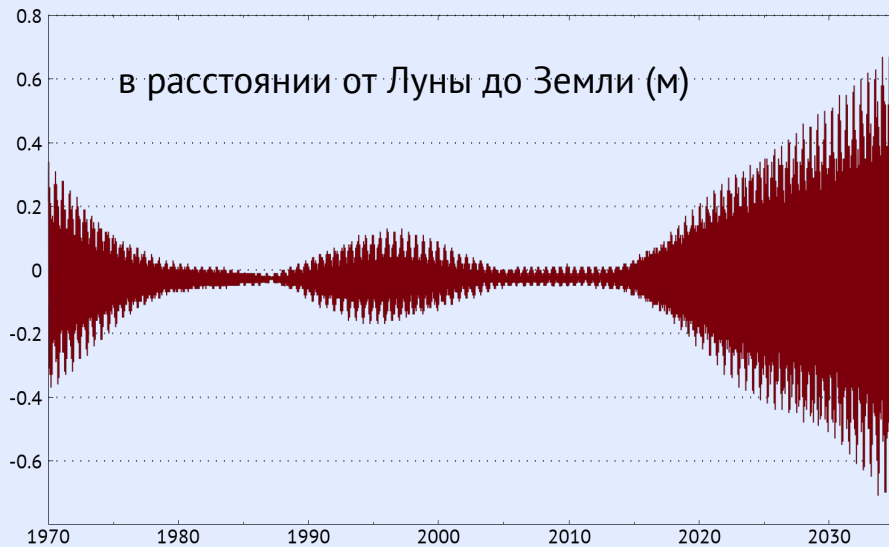
# Точность ( $1\sigma$ ) поправок к ПВЗ и ПВЛ



# Точность поправок с учётом ошибки $\Delta r$



# Сравнение лунной эфемериды EPM с DE430



# Выводы

- Точность наблюдений превосходит имеющиеся модели
- Океаническая нагрузка важна при обработке LLR-наблюдений
- Инфракрасные наблюдения наиболее перспективны для LLR
- Присутствуют систематические ошибки невыясненной природы (атмосфера? неучтённые приливы? вариации вращения?)
- Модель вращательного движения Луны может быть улучшена:
  - Рассогласование главных моментов инерции Луны с корой (ненулевые значения  $C_{21}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{22}$  в GL660b)
  - Дополнительная либрация в долготе
  - Расхождение решений GRAIL и LLR в  $S_{32}$ ,  $C_{33}$
- Эмпирическая оценка точности орбиты Луны на интервале наблюдений – 1 метр; требуется математическая оценка
- Необходимо проводить наблюдения для удержания точности

# Благодарности



**С. Л. Курдубов, Е. В. Питьева, В. И. Скрипниченко, В. В. Суворкин**  
ИПА РАН

**J. G. Williams**

NASA Jet Propulsion Laboratory

**Л. Ю. Петров**

NASA Goddard Space Flight Center, Astrogeo Center

**A. Fienga, J.-M. Torre**

Laboratoire Géoazur

**T. Murphy**

University of California San Diego, Apache Point Observatory

**Matthew Flatt**

University of Utah, PLT Inc