

Кардинальное обновление системы ЭРА

Дмитрий Павлов

ИПА РАН
09.10.2014

Авторы ЭРА-8

Д. А. Павлов

В. И. Скрипниченко

М. В. Филоненко

А. А. Фишков

В. О. Колонистов

(при помощи многочисленных коллег)

Цель и задачи

Цель (октябрь 2011): обеспечить поддержку и развитие программного комплекса ЭРА в долгосрочной перспективе

Задачи:

- ↪ Перевод комплекса на новую технологическую базу с сохранением совместимости;
- ↪ Разбор, документирование и обновление используемых математических моделей;
- ↪ Внедрение универсальной реализации комплекса в различных проектах ИПА РАН, проверка корректности работы.

Проекты

1. Фундаментальные эфемериды ЕРМ

Реализован и проверен весь цикл «обработка наблюдений → интегрирование → уточнение параметров». ЕРМ2014 будут выпущены с использованием ЭРА-8.

2. Эфемериды естественных спутников

Интегрирование, обработка наблюдений и уточнение параметров галилеевых спутников проведены в тестовом режиме.

3. Астрономический ежегодник

Реализовано и проверено формирование всех эфемеридных таблиц. Ежегодник на 2016 год будет выпущен с использованием ЭРА-8 (на 2015 год — частично).

База: системная часть

Для пользователя:

- ↪ Редактор таблиц
- ↪ Редактор программ на языке СЛОН
- ↪ Компилятор/интерпретатор языка СЛОН
- ↪ Средства построения графиков

Внутри программы:

- ↪ Библиотека математических функций
- ↪ Средства доступа к файлам численных теорий

База: редукции

- ↪ Модели прецессии и нутации: IAU1976/IAU1980, IAU2000/2006, звёздное время IERS 1992 и IAU2000
- ↪ Преобразования шкал времени: UTC↔TAI↔TT↔TDB
- ↪ Поправки EOP: xpole, upole, dpsi, deps, UT1
- ↪ Приливные эффекты (по стандартам IERS 1992)
- ↪ Движение тектонических плит (IERS 1992)
- ↪ Преобразования координат наблюдателя: LXY↔LLA↔XYZ
- ↪ Релятивистские поправки: планетная аберрация, годовая аберрация, эффект Шапиро, гравитационное отклонение света, ET-TAI (Moyer)
- ↪ Экваториальные, эклиптические, горизонтальные координаты наблюдаемого объекта
- ↪ Тропосферная задержка (Niell 1996, Marini 1973)
- ↪ Запаздывание в солнечной короне

База: численное интегрирование

- ↪ Интегратор Гаусса-Эверхарта-Авдюшева с постоянным шагом
- ↪ Правые части для:
 - ▷ астероидов (эффект Лензе-Тирринга, ускорение Шварцшильда, квадрупольный момент)
 - ▷ систем спутников (включая возмущения от гравитационного потенциала планеты)
 - ▷ Солнечной системы (возмущения от крупных астероидов и TNO, релятивистские эффекты, возмущения от сжатия Солнца, уравнения либрации Луны, возмущения от гравитационного потенциала Земли и Луны)

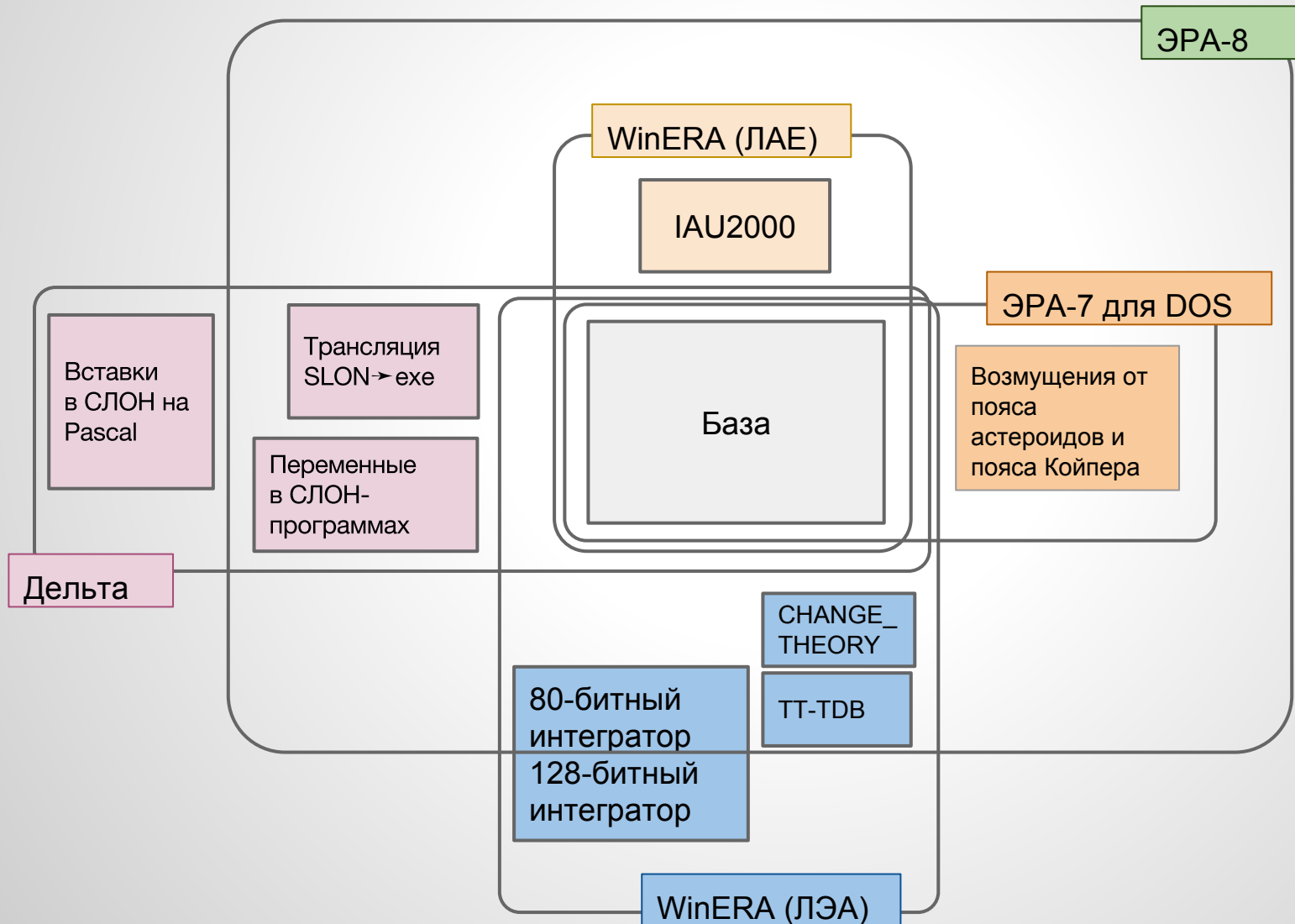
База: частные производные

- ↪ по элементам орбиты Земли, планеты, спутника
- ↪ по массе центрального тела
- ↪ по положению станции
- ↪ по положению отражателя или КА
- ↪ по начальному положению и углам либрации Луны, + по скоростям
- ↪ по коэффициентам гравитационного потенциала Луны
- ↪ по параметрам вращения Марса
- ↪ по H_2 , L_2 Земли и Луны
- ↪ по параметрам солнечной короны
- ↪ ... и другие производные, вычисляемые пользователями в СЛОН-программах

База: аналитические модели

- ↪ Спутники Сатурна: TASS 1.7 (1997)
- ↪ Галилеевы спутники Юпитера: GALSAT (1977)
- ↪ Спутники Урана: GUST86 (1987)
- ↪ Модели гравитационного потенциала Луны, Земли, Юпитера (датировка неизвестна)
- ↪ Модель вращения Марса (Питьева, 1999)
- ↪ Топография Венеры (Bills, Kobrick, 1985)
- ↪ Модели прецессии и нутации IAU1976/IAU1980, IAU2000 (полноценно используется только в Ежегоднике)

Расширения различных версий



Выбор языков программирования

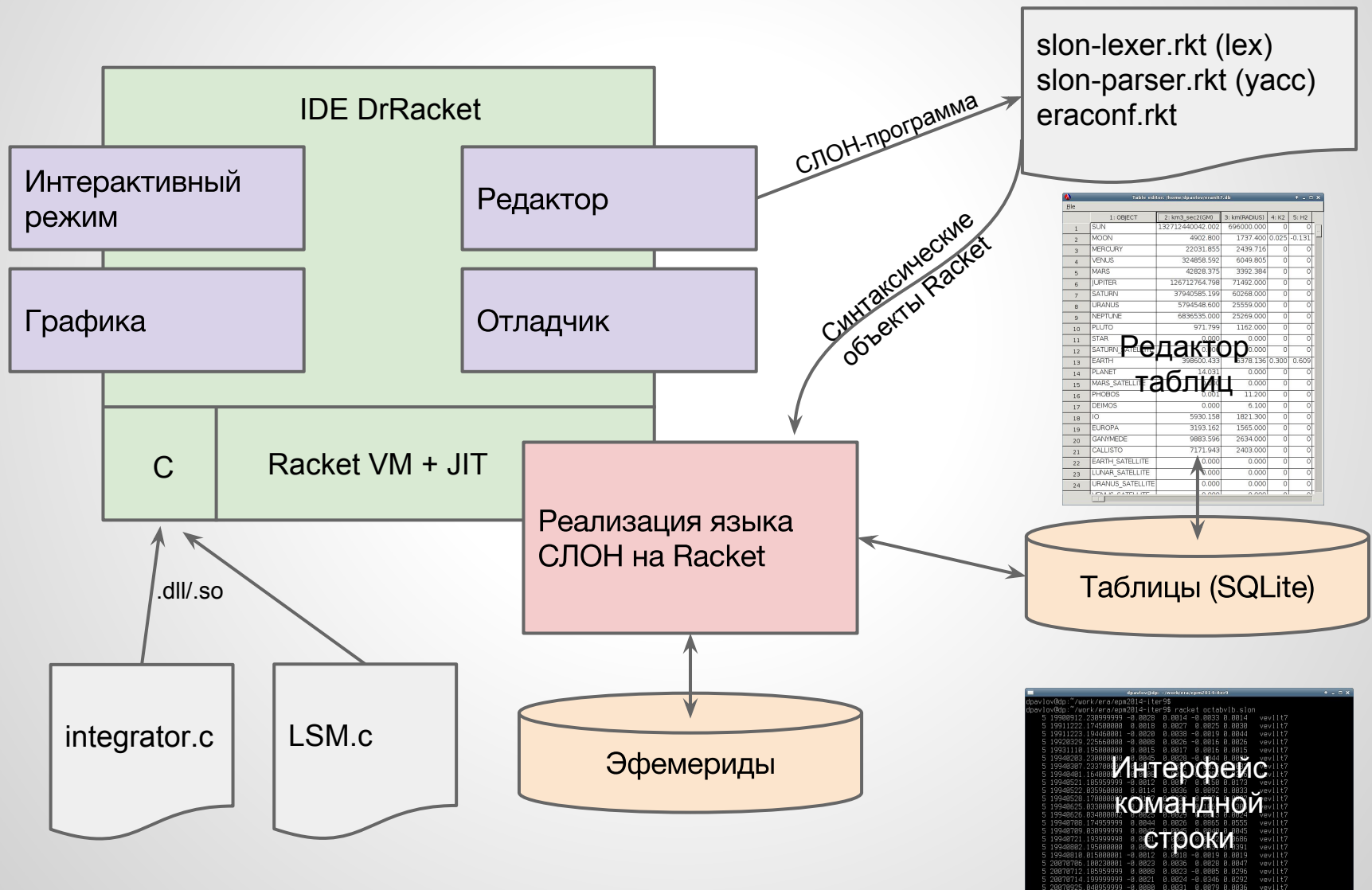
	Pascal	C/C++	Fortran	Java	C#	Python	Racket
Кросс-платформенность	не Borland	✓	✓	✓	не MS	✓	✓
Максимальное быстродействие	?	✓	✓	✗	✓	✗	✗
Extended precision	✓	✓ (Intel, GNU)	не Intel	✗	✗	✗	✓ (М.Ф.)
Автоматическое управление памятью	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Высокоуровневые макросы	✗	✓ (C++)	✗	✗	✗	✗	✓
Стандартные средства GUI	✓	✓ (Qt)	✗	✓	✓	✗	✓

Уникальная особенность Racket — средства создания языков, транслирующихся в объекты синтаксиса хост-языка. IDE DrRacket используется для языка СЛОН.

Также в Racket: полная поддержка Unicode, именованные аргументы функций, треды, Web, интерактивный режим, средства построения графиков, связка с C, открытая разработка.

Выбраны: **C** для вычислений, **Racket** для реализации языка СЛОН, логики и GUI.

Архитектура комплекса ЭРА-8



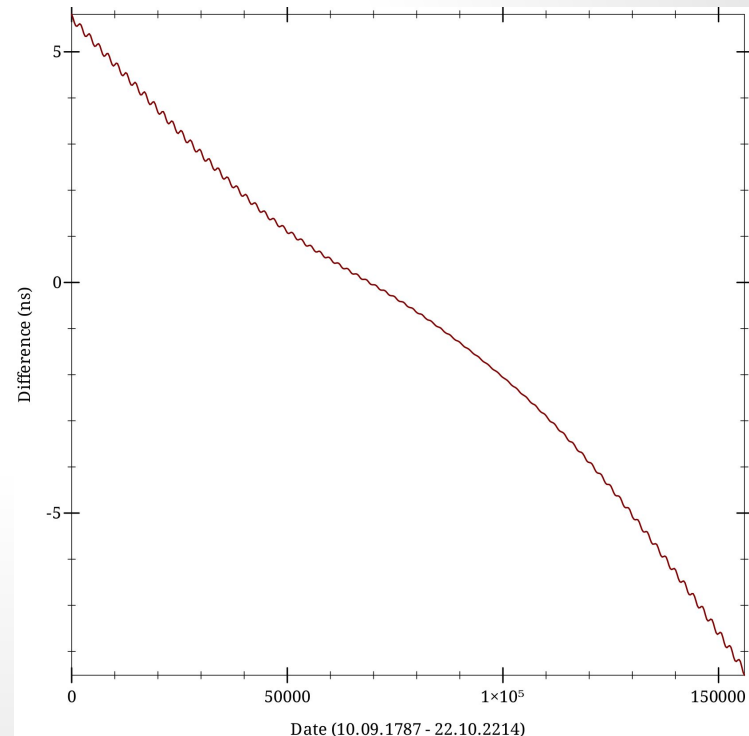
Технологические улучшения

	ЭРА для DOS, WinERA	ЭРА-8
Формат численных теорий	.08b, .rea (формат заголовка специфичен для версии)	Чтение: все имеющиеся форматы, SPK. Запись: .08b, SPK
Доступ к сторонним эфемеридам	путём преобразования DE → .rea	Доступ к файлам SPK без преобразований.
Представление расстояния	АЕ (не фиксированная)	АЕ или км, в зависимости от эфемериды
Формат таблиц	.era (≤ 256 атрибутов)	Чтение: .era, .db Запись: .db (SQLite)
Представление даты	extended (18 десятичных знаков, потенциальные проблемы с совместимостью)	double+double (30 десятичных знаков)
Управление памятью	собственный менеджер памяти, созданный во времена БЭСМ	автоматическая сборка мусора в Racket VM
Генератор парсеров	собственный (ШАГ), без исходн. кода	общепринятый (lex + yacc)
Переносимость	DOS, Windows (Linux?)	Windows, Linux, (Mac)
Ограничения	на количество атрибутов вообще и в вызове актора, на размер СЛОН-программы	никаких ограничений

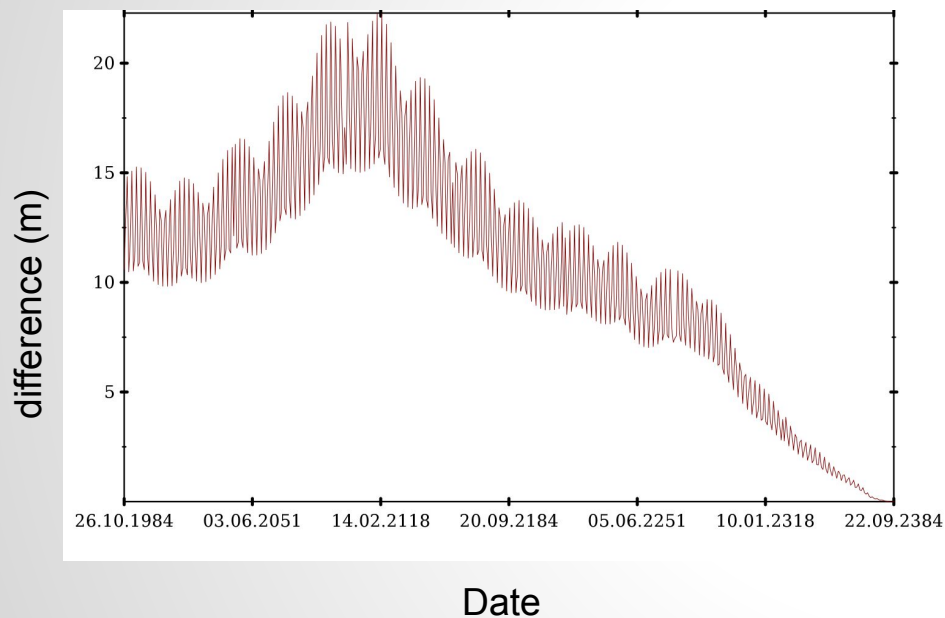
TT-TDB

Реализовано численное интегрирование TT-TDB с произвольным количеством астероидов (осуществлено с 322).

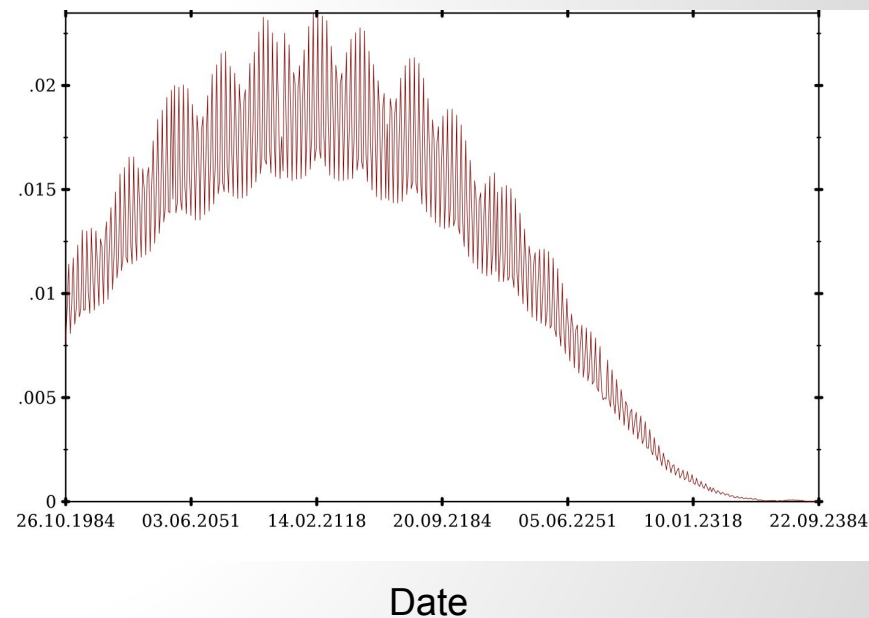
Разность между эфемеридами TT-TDB DE430 и EPM2011 на отрезке длиной в 427 лет: от 6 до -9 нс.



Точность интегрирования (Меркурий)

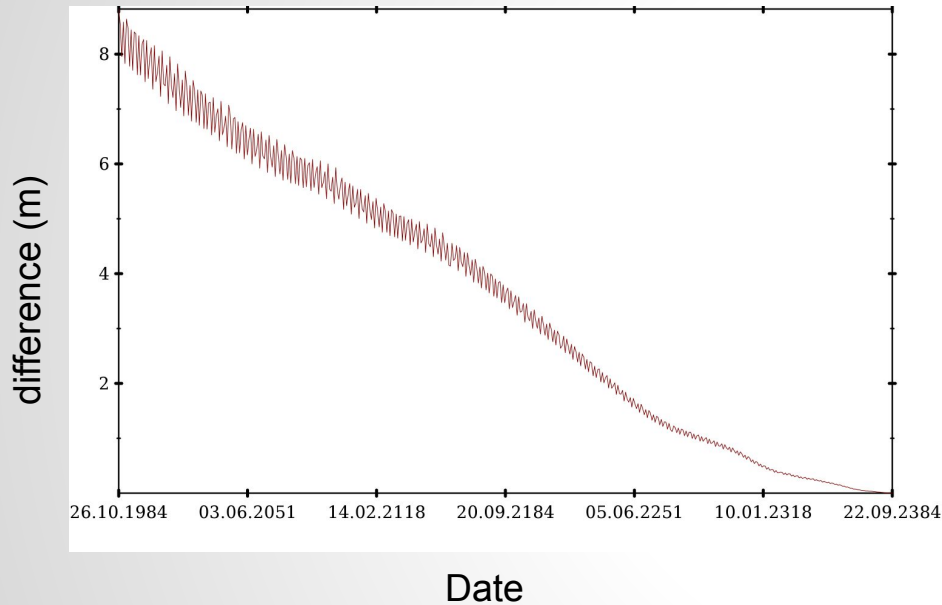


double precision

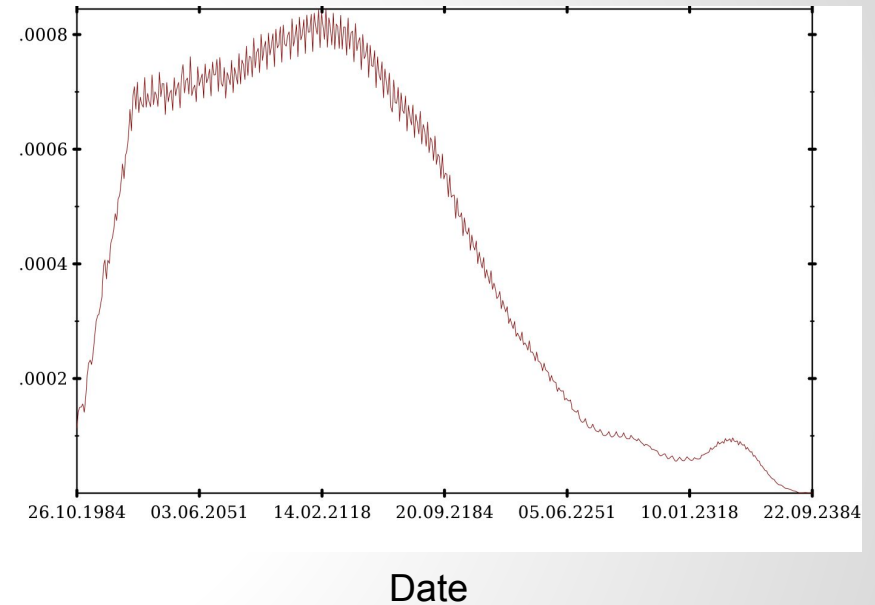


extended precision

Точность интегрирования (Луна)

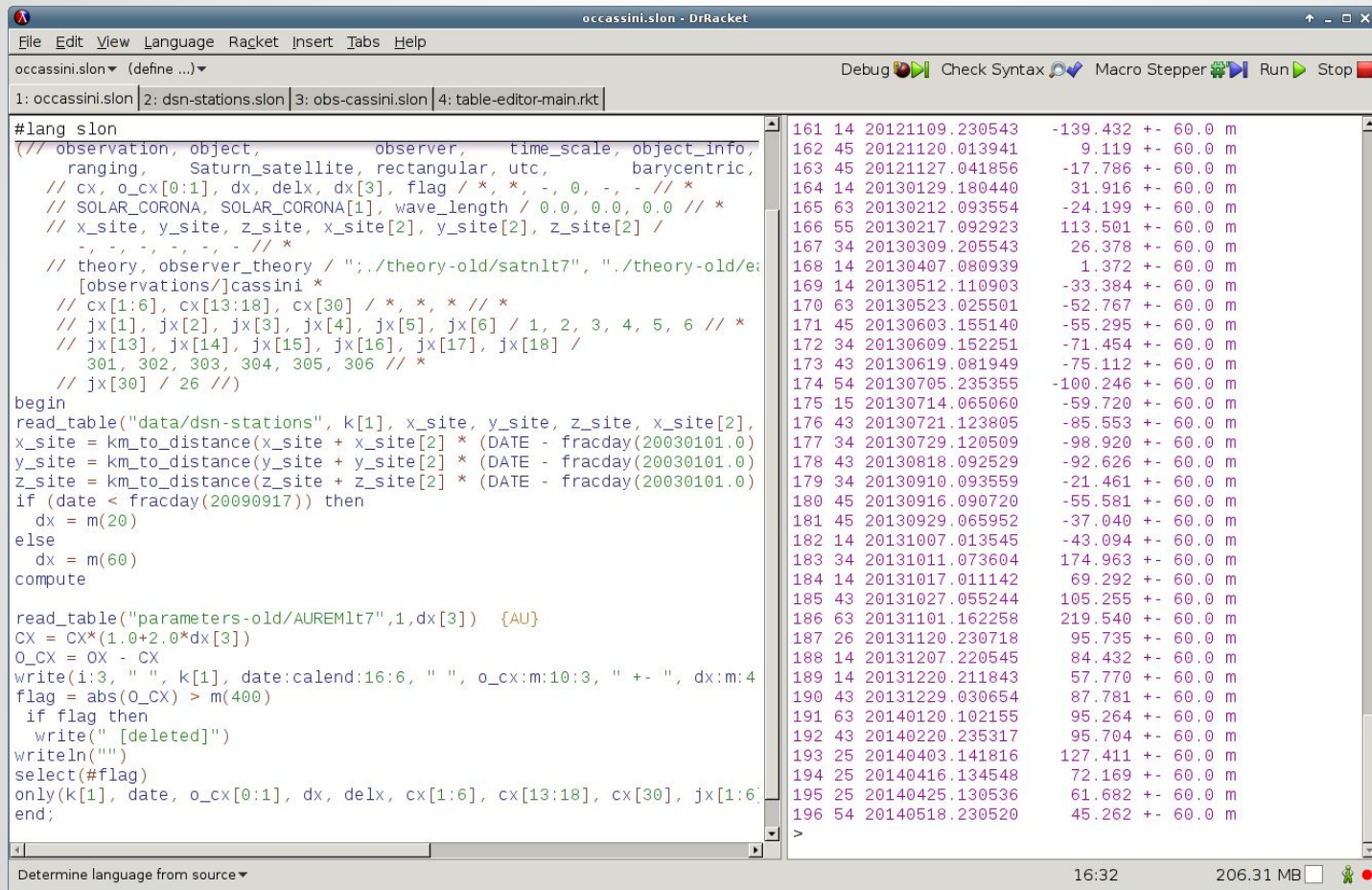


double precision



extended precision

Обработка наблюдений Cassini



```
occassini.slون - DrRacket
File Edit View Language Racket Insert Tabs Help
occassini.slون (define ...)
1: occassini.slون 2: dsn-stations.slون 3: obs-cassini.slون 4: table-editor-main.rkt

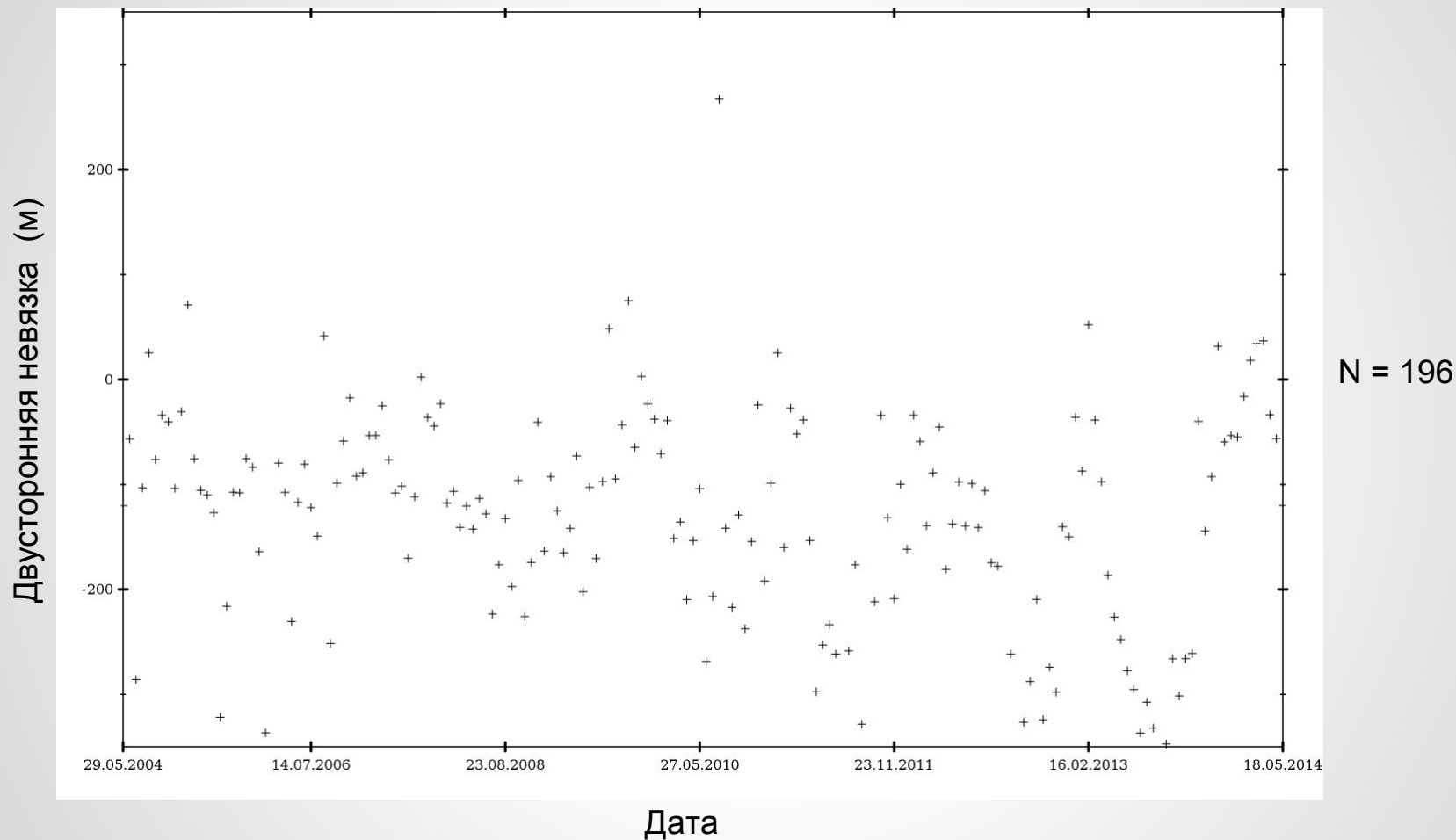
#lang slон
(// observation, object, observer, time_scale, object_info,
 ranging, Saturn_satellite, rectangular, utc, barycentric,
 // cx, o_cx[0:1], dx, delx, dx[3], flag / *, *, -, 0, -, - // *
 // SOLAR_CORONA, SOLAR_CORONA[1], wave_length / 0.0, 0.0, 0.0 // *
 // x_site, y_site, z_site, x_site[2], y_site[2], z_site[2] /
 -, -, -, -, -, - // *
 // theory, observer_theory / "://theory-old/satnlt7", "://theory-old/e
 [observations/]cassini *
 // cx[1:6], cx[13:18], cx[30] / *, *, *, * // *
 // jx[1], jx[2], jx[3], jx[4], jx[5], jx[6] / 1, 2, 3, 4, 5, 6 // *
 // jx[13], jx[14], jx[15], jx[16], jx[17], jx[18] /
 301, 302, 303, 304, 305, 306 // *
 // jx[30] / 26 //)
begin
read_table("data/dsn-stations", k[1], x_site, y_site, z_site, x_site[2],
x_site = km_to_distance(x_site + x_site[2] * (DATE - fracday(20030101.0)
y_site = km_to_distance(y_site + y_site[2] * (DATE - fracday(20030101.0)
z_site = km_to_distance(z_site + z_site[2] * (DATE - fracday(20030101.0)
if (date < fracday(20090917)) then
  dx = m(20)
else
  dx = m(60)
compute

read_table("parameters-old/AUREMlt7", 1, dx[3]) {AU}
CX = CX*(1.0+2.0*dx[3])
O_CX = OX - CX
write(i:3, " ", k[1], date:calend:16:6, " ", o_cx:m:10:3, " +- ", dx:m:4
flag = abs(O_CX) > m(400)
  if flag then
    write(" [deleted]")
writeln("")
select(#flag)
only(k[1], date, o_cx[0:1], dx, delx, cx[1:6], cx[13:18], cx[30], jx[1:6]
end;

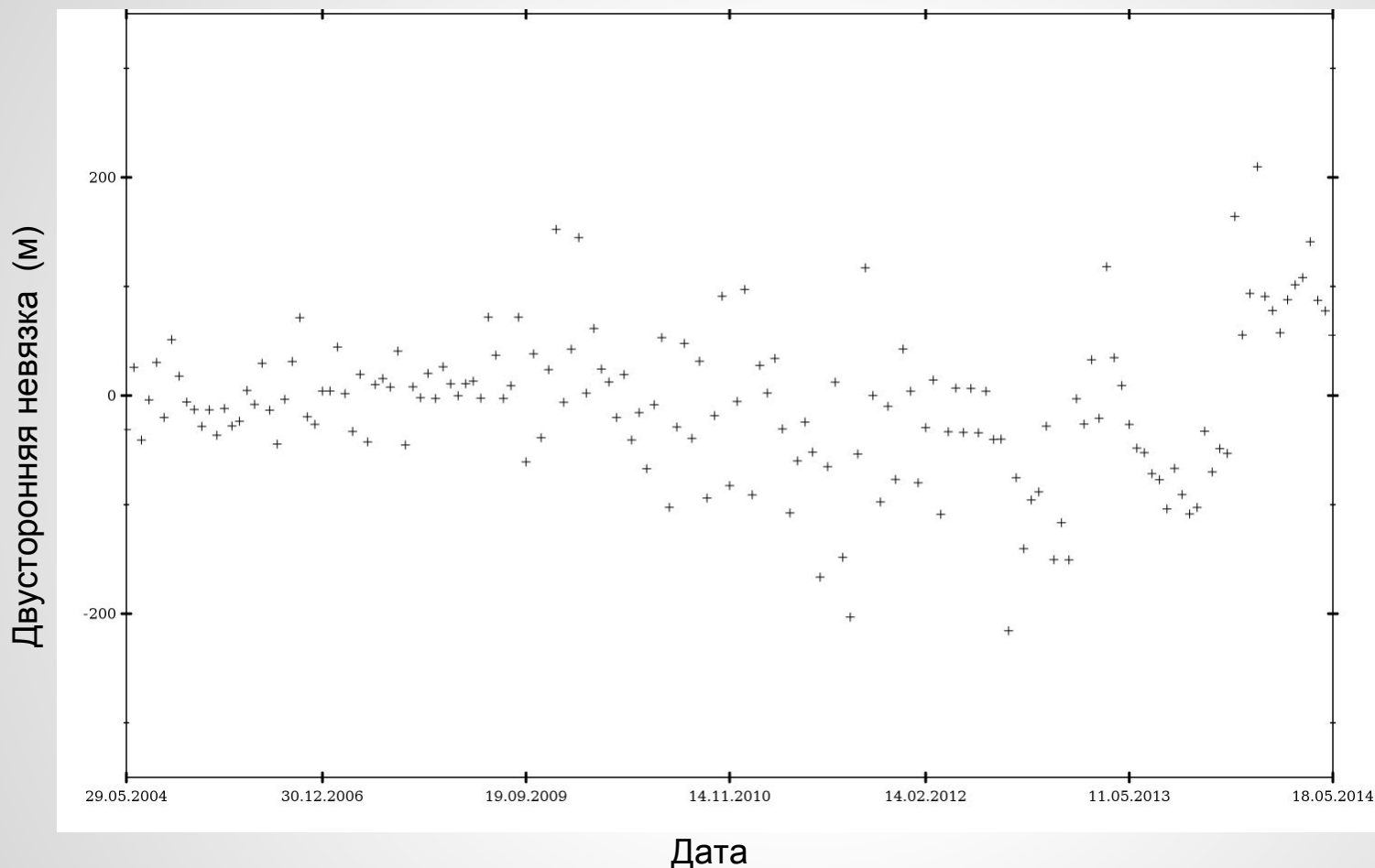
161 14 20121109.230543 -139.432 +- 60.0 m
162 45 20121120.013941 9.119 +- 60.0 m
163 45 20121127.041856 -17.786 +- 60.0 m
164 14 20130129.180440 31.916 +- 60.0 m
165 63 20130212.093554 -24.199 +- 60.0 m
166 55 20130217.092923 113.501 +- 60.0 m
167 34 20130309.205543 26.378 +- 60.0 m
168 14 20130407.080939 1.372 +- 60.0 m
169 14 20130512.110903 -33.384 +- 60.0 m
170 63 20130523.025501 -52.767 +- 60.0 m
171 45 20130603.155140 -55.295 +- 60.0 m
172 34 20130609.152251 -71.454 +- 60.0 m
173 43 20130619.081949 -75.112 +- 60.0 m
174 54 20130705.235355 -100.246 +- 60.0 m
175 15 20130714.065060 -59.720 +- 60.0 m
176 43 20130721.123805 -85.553 +- 60.0 m
177 34 20130729.120509 -98.920 +- 60.0 m
178 43 20130818.092529 -92.626 +- 60.0 m
179 34 20130910.093559 -21.461 +- 60.0 m
180 45 20130916.090720 -55.581 +- 60.0 m
181 45 20130929.065952 -37.040 +- 60.0 m
182 14 20131007.013545 -43.094 +- 60.0 m
183 34 20131011.073604 174.963 +- 60.0 m
184 14 20131017.011142 69.292 +- 60.0 m
185 43 20131027.055244 105.255 +- 60.0 m
186 63 20131101.162258 219.540 +- 60.0 m
187 26 20131120.230718 95.735 +- 60.0 m
188 14 20131207.220545 84.432 +- 60.0 m
189 14 20131220.211843 57.770 +- 60.0 m
190 43 20131229.030654 87.781 +- 60.0 m
191 63 20140120.102155 95.264 +- 60.0 m
192 43 20140220.235317 95.704 +- 60.0 m
193 25 20140403.141816 127.411 +- 60.0 m
194 25 20140416.134548 72.169 +- 60.0 m
195 25 20140425.130536 61.682 +- 60.0 m
196 54 20140518.230520 45.262 +- 60.0 m
>

Determine language from source 16:32 206.31 MB
```

Cassini: изначальные невязки



Cassini: остаточные невязки



N = 161
RMS = 40m

Ephemeris	Planet	a [m]	$\sin i \cos \Omega$ [mas]	$\sin i \sin \Omega$ [mas]	$e \cos \pi$ [mas]	$e \sin \pi$ [mas]	λ [mas]
EPH2004	Saturn	4222	3.237	4.085	3.858	2.975	3.474
EPH2008		12.026	0.09448	0.09246	0.00161	0.00135	0.02477
EPH2011		70.519	0.10792	0.12023	0.01093	0.00327	0.03434
EPH2013		67.973	0.09517	0.10313	0.01021	0.00276	0.02885
EPH2014		4.828	0.08065	0.05726	0.00097	0.00035	0.01239

Модель движения и либрации Луны

The Planetary and Lunar Ephemerides DE430 and DE431

William M. Folkner,* James G. Williams,† Dale H. Boggs,‡
Ryan S. Park,* and Petr Kuchynka*

$$\begin{bmatrix} \ddot{\xi} \\ \ddot{\eta} \\ \ddot{\zeta} \end{bmatrix} = -\frac{GM}{r^2} \left\{ \sum_{n=2}^{n_1} J_n \left(\frac{R}{r} \right)^n \begin{bmatrix} (n+1)P_n(\sin \varphi) \\ 0 \\ -\cos \varphi P'_n(\sin \varphi) \end{bmatrix} \right. \\ \left. + \sum_{n=2}^{n_2} \left(\frac{R}{r} \right)^n \sum_{m=1}^n \begin{bmatrix} -(n+1)P_n^m(\sin \varphi)[+C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda] \\ m \sec \varphi P_n^m(\sin \varphi)[-C_{nm} \sin m\lambda + S_{nm} \cos m\lambda] \\ \cos \varphi P_n^m(\sin \varphi)[+C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda] \end{bmatrix} \right\}$$

$$J_{2,M}(t) = \frac{I_{33,T}(t) - \frac{1}{2}[I_{11,T}(t) + I_{22,T}(t)]}{m_M R_M^2}$$

$$C_{22,M}(t) = \frac{I_{22,T}(t) - I_{11,T}(t)}{4m_M R_M^2}$$

$$C_{21,M}(t) = -I_{13,T}(t)/m_M R_M^2$$

$$S_{21,M}(t) = -I_{32,T}(t)/m_M R_M^2$$

$$S_{22,M}(t) = -I_{21,T}(t)/2m_M R_M^2$$

$$A_T = \frac{2(1 - \beta_L \gamma_L)}{(2\beta_L - \gamma_L + \beta_L \gamma_L)} m_M R_M^2 \tilde{J}_{2,M}$$

$$B_T = \frac{2(1 + \gamma_L)}{(2\beta_L - \gamma_L + \beta_L \gamma_L)} m_M R_M^2 \tilde{J}_{2,M}$$

$$C_T = \frac{2(1 + \beta_L)}{(2\beta_L - \gamma_L + \beta_L \gamma_L)} m_M R_M^2 \tilde{J}_{2,M}$$

$$\mathbf{I}_m(t) = \tilde{\mathbf{I}}_m - \frac{k_{2,M} m_E R_M^5}{r^5} \begin{bmatrix} x^2 - \frac{1}{3}r^2 & xy & xz \\ xy & y^2 - \frac{1}{3}r^2 & yz \\ xz & yz & z^2 - \frac{1}{3}r^2 \end{bmatrix}$$

$$+ \frac{k_{2,M} R_M^5}{3G} \begin{bmatrix} \omega_{m,x}^2 - \frac{1}{3}(\omega_m^2 - n^2) & \omega_{m,x}\omega_{m,y} & \omega_{m,x}\omega_{m,z} \\ \omega_{m,x}\omega_{m,y} & \omega_{m,y}^2 - \frac{1}{3}(\omega_m^2 - n^2) & \omega_{m,y}\omega_{m,z} \\ \omega_{m,x}\omega_{m,z} & \omega_{m,y}\omega_{m,z} & \omega_{m,z}^2 - \frac{1}{3}(\omega_m^2 + 2n^2) \end{bmatrix}$$

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_m = \mathbf{I}_m^{-1} \left\{ \sum_{A \neq M} \mathbf{N}_{M,figM-pmA} + \mathbf{N}_{M,figM-figE} - \dot{\mathbf{I}}_m \boldsymbol{\omega}_m - \boldsymbol{\omega}_m \times \mathbf{I}_m \boldsymbol{\omega}_m + \mathbf{N}_{cmb} \right\}$$

$$\mathbf{a}_{M,tide} = \frac{3}{2} \left(\frac{m_E + m_M}{m_E} \right) \frac{G m_T R_E^5}{r^5} \left\{ \frac{k_{20,E}}{r_0^{*5}} \left([2z_0^{*2} z + \rho_0^{*2} \boldsymbol{\rho}] - \frac{5[(zz_0^*)^2 + \frac{1}{2}(\rho \rho_0^*)^2] \mathbf{r}}{r^2} + r_0^{*2} \mathbf{r} \right) \right. \\ \left. + \frac{k_{21,E}}{r_1^{*5}} \left(2[(\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}_1^*) z_1^* + z z_1^* \boldsymbol{\rho}_1^*] - \frac{10 z z_1^* (\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}_1^*) \mathbf{r}}{r^2} \right) \right. \\ \left. + \frac{k_{22,E}}{r_2^{*5}} \left([2(\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}_2^*) \boldsymbol{\rho}_2^* - \rho_2^{*2} \boldsymbol{\rho}] - \frac{5[(\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}_2^*)^2 - \frac{1}{2}(\rho \rho_2^*)^2] \mathbf{r}}{r^2} \right) \right\}$$

$$\dot{\mathbf{I}}_m = \frac{5k_{2,M} m_E R_M^5}{r^7} \begin{bmatrix} x^2 - \frac{1}{3}r^2 & xy & xz \\ xy & y^2 - \frac{1}{3}r^2 & yz \\ xz & yz & z^2 - \frac{1}{3}r^2 \end{bmatrix}$$

$$- \frac{k_{2,M} m_E R_M^5}{r^5} \begin{bmatrix} 2(x\dot{x} - \frac{1}{3}\mathbf{r} \cdot \dot{\mathbf{r}}) & x\dot{y} + \dot{x}y & x\dot{z} + \dot{x}z \\ x\dot{y} + \dot{x}y & 2(y\dot{y} - \frac{1}{3}\mathbf{r} \cdot \dot{\mathbf{r}}) & y\dot{z} + \dot{y}z \\ x\dot{z} + \dot{x}z & y\dot{z} + \dot{y}z & 2(z\dot{z} - \frac{1}{3}\mathbf{r} \cdot \dot{\mathbf{r}}) \end{bmatrix}$$

$$+ \frac{k_{2,M} R_M^5}{3G} \begin{bmatrix} 2(\omega_{m,x}\dot{\omega}_{m,x} - \frac{1}{3}\boldsymbol{\omega}_m \cdot \dot{\boldsymbol{\omega}}_m) & \omega_{m,x}\dot{\omega}_{m,y} + \dot{\omega}_{m,x}\omega_{m,y} & \omega_{m,x}\dot{\omega}_{m,z} + \dot{\omega}_{m,x}\omega_{m,z} \\ \omega_{m,x}\dot{\omega}_{m,y} + \dot{\omega}_{m,x}\omega_{m,y} & 2(\omega_{m,y}\dot{\omega}_{m,y} - \frac{1}{3}\boldsymbol{\omega}_m \cdot \dot{\boldsymbol{\omega}}_m) & \omega_{m,y}\dot{\omega}_{m,z} + \dot{\omega}_{m,y}\omega_{m,z} \\ \omega_{m,x}\dot{\omega}_{m,z} + \dot{\omega}_{m,x}\omega_{m,z} & \omega_{m,y}\dot{\omega}_{m,z} + \dot{\omega}_{m,y}\omega_{m,z} & 2(\omega_{m,z}\dot{\omega}_{m,z} - \frac{1}{3}\boldsymbol{\omega}_m \cdot \dot{\boldsymbol{\omega}}_m) \end{bmatrix}$$

Состояние лунной модели DE в ЭРА-8

Взята модель лунного потенциала GRAIL 660B.

Реализовано и проверено уточнение следующих параметров:

- ↪ Начальное положение и скорость Луны
- ↪ Начальные значения и скорости углов Эйлера
- ↪ Сумма масс Земли и Луны
- ↪ Отношение масс Земли и Луны
- ↪ Положение отражателей
- ↪ Положение станций
- ↪ H_2 , L_2 Луны и Земли
- ↪ β , γ
- ↪ Задержка прилива для Луны, три задержки для Земли (зональная, суточная, полусуточная)
- ↪ Коэффициенты лунного потенциала C_{32} , S_{32} , S_{33}

Ведётся уточнение параметров по наблюдениям.

Улучшения в автоматизации ЕРМ

- ↪ Файл задачи LSM-процессора из ЭРА-7 (DOS) был транслирован в СЛОН-программу для ЭРА-8
- ↪ Автоматизированы внесения поправок к параметрам вращения Марса, радиусам планет и др.
- ↪ Сделан более информативным вывод результатов LSM-процессора
- ↪ В язык СЛОН добавлены вложенные комментарии и переменные

Пример СЛОН-программы

```
var idx = 1;
var size;

{ global variables related to Earth and Moon mass corrections }
var gm_earth, gm_moon, EM_ratio, EM_sum, delta_gm, EM_changed = No;

:= [parameters-old/]eranlt7 begin
  if i = 2 then gm_moon = gm
  if i = 13 then gm_earth = gm
end;

:= // n, dx, comment / -, -, - // begin
  { This is a {nested} comment }
  EM_ratio = gm_earth / gm_moon
  EM_sum = gm_earth + gm_moon
  size = table_size("lsm/llr_params")
  idx = 0
  repeat
    idx = idx + 1
    read_table("lsm/llr_params", idx, n, dx, comment)
    if n = 401 then begin
      writeln("EM mass sum changed by ", dx:KM3_SEC2:20:10, " from ",
        EM_sum:KM3_SEC2:20:10, " to ", (EM_sum + dx):KM3_SEC2:20:10)
      EM_sum = EM_sum + dx
      EM_changed = Yes
    end
    if n = 402 then begin
      writeln("EM mass ratio changed by ", dx:20:17, " from ",
        EM_ratio:20:17, " to ", (EM_ratio + dx):20:17)
      EM_ratio = EM_ratio + dx
      EM_changed = Yes
    end
  until idx = size
  if EM_changed then begin
    gm_moon = EM_sum / (EM_ratio + 1)
    gm_earth = EM_sum - gm_moon
  end
end;
```

Объём исходного кода

Компонент	Число строк кода (WinEra, 2011)	Число строк кода (ЭРА-8)
COMPUTE + INTEGRATOR	20000 (Pascal)	9700 (Racket) + 700 (C)
LSM_PROCESSOR	1000 (Pascal)	1400 (C)
Системная часть	10500 (Pascal) + 700 (lx, gr)	5800 (Racket)
Конфигурация языка СЛОН	800 (JACC)	500 (Racket)
Среда разработки	29000 (Pascal)	1300 (Racket) + DrRacket

(данные приблизительные; пустые строки и комментарии не считаются)

Вниманию пользователей ЭРА-8

- ↪ Сборки для DOS нет
- ↪ Акторы CLEAR_SCREEN и GOTOXY отсутствуют
- ↪ В начале СЛОН-программы нужно писать #lang slon (при работе в DrRacket)
- ↪ Табличный редактор является отдельным приложением (пока)
- ↪ Пути к таблицам должны оканчиваться слешем:
[/path/to/]table вместо [/path/to]table
- ↪ Кодировка текста в файлах таблиц — UTF8 (совместима с ASCII)
- ↪ Файлы планетных теорий скрыты; доступ к данным осуществляется через вызовы DIFFERENT_THEORY, OBJECT_GM и т.д.
- ↪ Для пользователей Linux:
 - ▷ чувствительность к регистру: table и Table — разные таблицы
 - ▷ обратные слеша ([\path\to\]table) не допускаются; прямые работают и в Linux и в Windows

Будущее

Ближайшее:

- ↪ Переход на библиотеку SOFA и соглашения IERS 2010
- ↪ Фиксирование величины АЕ
- ↪ Выпуск EPM2014

Средней дальности:

- ↪ Встраивание табличного редактора в DrRacket
- ↪ Создание инсталлятора
- ↪ Документация с описанием алгоритмов
- ↪ Улучшение быстродействия (C, распараллеливание)

Далёкое:

- ↪ Исследование алгоритмов численного интегрирования
- ↪ Логгер
- ↪ Система регрессионных тестов
- ↪ Доступ к возможностям комплекса без применения языка СЛОН