

Российская академия наук  
Институт прикладной астрономии

Сообщения ИПА РАН

№ 141

В. С. Губанов, И. Ф. Суркис

**Обработка РСДБ-наблюдений:  
Программный пакет QUASAR.  
I. Редукция данных наблюдений**

Санкт-Петербург  
2002

УДК 521.8

В. С. Губанов, И. Ф. Суркис. Обработка РСДБ-наблюдений: Программный пакет QUASAR. I. Редукция данных наблюдений.

**Ключевые слова:** РСДБ-наблюдения, релятивистская теория редукций, опорные системы координат и времени, ошибки наблюдений, параметры настройки вычислений.

Описываются алгоритмы астрономических и геодезических редукций и вычисления частных производных, которые применяются в новом программном пакете QUASAR, предназначенном для обработки РСДБ-наблюдений на глобальных сетях станций. Все эти алгоритмы согласованы с рекомендациями IERS Standards (1992) [1], IERS Conventions (1996) [2], их последующими уточнениями [6], [8], [10], [13], [15], [17], [18], а также с предварительной версией IERS Conventions (2000), доступной на web-сайте [24].

V. S. Gubanov, I. F. Surkis. Processing of VLBI Observations: Software QUASAR. I. Reduction of Observation Data.

**Keywords:** VLBI observations, relativistic theory, reference frames of coordinates and time, observation errors, tuning of calculation process.

The astronomical and geodetic reduction and partial derivatives algorithms used in a new software QUASAR intended for processing of VLBI observation at global networks are described. All these algorithms are consistent with recommendation of the IERS Standards (1992) [1], IERS Conventions (1996) [2], their subsequent corrections [6], [8], [10], [13], [15], [17], [18] and draft version of IERS Conventions (2000) available at anonymous web-site [24].

Сообщения Института прикладной астрономии РАН № 141 – Санкт-Петербург, 2002. – 32 с.

© Институт прикладной астрономии, 2002.

## Содержание

|  |    |
|--|----|
| 1. Введение  | 4  |
| 2. Астрометрическая редукция РСДБ-наблюдений         | 5  |
| 2.1. Основные редукционные формулы . . . . .         | 5  |
| 2.2. Основные априорные данные . . . . .             | 10 |
| 2.2.1. Опорные системы . . . . .                     | 10 |
| 2.2.2. Прецессия и нутация Земли . . . . .           | 11 |
| 2.3. Структурная задержка . . . . .                  | 14 |
| 2.4. Геофизические эффекты . . . . .                 | 18 |
| 2.4.1. Полусной прилив . . . . .                     | 18 |
| 2.4.2. Океаническая и атмосферная нагрузки . . . . . | 19 |
| 2.4.3. Последледниковые поднятия . . . . .           | 20 |
| 2.4.4. Приливные деформации Земли . . . . .          | 21 |
| 2.5. Инструментальные и локальные эффекты . . . . .  | 22 |
| 2.5.1. Антенный вынос . . . . .                      | 22 |
| 2.5.2. Ориентация и температурные деформации антенн  | 24 |
| 2.5.3. Атмосферная рефракция . . . . .               | 24 |
| 2.5.4. Тропосферная задержка . . . . .               | 25 |
| 2.5.5. Ионосферная задержка . . . . .                | 26 |
| 3. Настройка редукционных вычислений                 | 26 |
| 4. Перечень частных производных                      | 28 |
| 5. Заключение  | 30 |
| Список литературы                                    | 31 |

# 1. Введение

Непрерывный рост количества и точности РСДБ-наблюдений, а также усложнение научных задач, решаемых с их помощью, требует постоянного совершенствования программных средств обработки этих наблюдений. В мире существует несколько программных пакетов, используемых для этой цели — CALC/SOLVE, Ossam, MODEST, SteelBreeze, ЭРА и др., однако на уровне точности порядка 0.1 mas все они дают заметно различающиеся результаты при обработке одних и тех же наблюдений. Одна из причин этих расхождений заключается в недостаточной согласованности редуccionных алгоритмов и априорных данных, а другая проистекает из применения различных методов моделирования наблюдений и оценивания неизвестных параметров.

Новый многофункциональный программный пакет ИПА РАН QUASAR (Quantitative Analysis and Series Adjustment in Radioastrometry) создавался в течение двух лет и уже год находится в опытной эксплуатации. Основная цель работы состояла в том, чтобы достичь максимальной точности редуccionных вычислений и реализовать на этой общей основе несколько разных методов параметрического оценивания с использованием стохастического и динамического моделирования. Можно рассчитывать, что такой подход позволит получить объективную информацию о возможностях и недостатках этих методов, поможет выработать рекомендации по их применению в зависимости от научных задач, решаемых с помощью РСДБ-наблюдений.

Редуccionная часть пакета первоначально создавалась в строгом соответствии с рекомендациями IERS Standards (1992) и IERS Conventions (1996), но потом в нее стали вноситься некоторые уточнения согласно публикациям авторитетных авторов [6], [8], [10], [13], [15], [17], [18]. Наконец, в начале 2001 г. в Internet появилась web-страница IERS Conventions (2000) [24], где тоже оказалось довольно много важных изменений. К моменту публикации настоящей статьи все эти изменения учтены, что позволило заметно повысить точность вычислений.

## 2. Астрометрическая редукция РСДБ-наблюдений

Основная задача астрометрической редукции заключается в том, чтобы на основании имеющихся теорий и априорных данных как можно точнее предвычислить измеренные в процессе РСДБ-наблюдений величины групповой задержки  $\tau$  и скорости ее изменения  $\varrho = \dot{\tau} = \partial\tau/\partial t$ . Принята следующая концепция редукционных вычислений:

- вычисления временной задержки и ее скорости выполняются в квази-инерциальной барицентрической небесной системе координат ICRS на эпоху J2000.0;
- инструментальные параметры, ошибки измерений и геофизические эффекты учитываются в геоцентрической земной системе координат ITRS, а затем трансформируются в систему ICRS;
- конкретные реализации этих систем ICRF и ITRF, создаваемые службой IERS, параметры их взаимной ориентации (EOP), инструментальные, геофизические и релятивистские эффекты учитываются в полном соответствии с рекомендациями IERS.

### 2.1. Основные редукционные формулы

В барицентрической системе координат  $(X_1, X_2, X_3)$  разность моментов прихода одного и того же волнового фронта от произвольного внегалактического радиоисточника в точки пространства 1 и 2 (вакуумная задержка), измеренная в одной и той же шкале атомного барицентрического времени TCB (Time Coordinate for the Barycentric system), равна

$$\tau_v = T_2 - T_1 = -\frac{1}{c}\vec{k} \cdot (\vec{R}_2(T_2) - \vec{R}_1(T_1)) + \tau_{grav},$$

где  $c$  — скорость света,  $\vec{k}$  — единичный вектор направления на источник,  $\vec{R}_i$ ,  $(i = 1, 2)$  — барицентрические векторы направления на  $i$ -ю точку пространства,  $\tau_{grav}$  — суммарная гравитационная задержка, вызванная искривлением траектории радиосигнала в поле притяжения Земли, Луны, Солнца, Юпитера и Сатурна.

Преобразование этой формулы в геоцентрическую систему координат  $(x_1, x_2, x_3)$  имеет вид [2], [3]

$$\tau_v = t_{v2} - t_{v1} = \left\{ \tau_{grav} - \frac{\vec{k} \cdot \vec{b}}{c} \left[ 1 - (1 + \gamma)U - \frac{|\vec{V}|^2}{2c^2} - \frac{\vec{V} \cdot \vec{v}_2}{c^2} \right] - \frac{\vec{V} \cdot \vec{b}}{c^2} \left( 1 + \frac{\vec{k} \cdot \vec{V}}{2c} \right) \right\} \left[ 1 + \frac{\vec{k} \cdot (\vec{V} + \vec{v}_2)}{c} \right]^{-1}. \quad (1)$$

Здесь  $t_{v1}, t_{v2}$  — моменты прихода волнового фронта последовательно на наземные пункты 1 и 2, измеренные в шкале координированного атомного времени UTC;  $\vec{b} = \vec{r}_2(t_1) - \vec{r}_1(t_1)$  — геоцентрический вектор базы, направленный из пункта 1 в пункт 2;  $\vec{r}_i$  — геоцентрический вектор  $i$ -го пункта;  $\gamma$  — параметр PPN (для ОТО  $\gamma = 1$ ),  $U$  — гравитационный потенциал Солнца в геоцентре,  $\vec{V}$  — барицентрическая скорость геоцентра;  $\vec{v}_i$  — геоцентрическая скорость  $i$ -го пункта,  $\tau_{grav} = \tau_{\oplus} + \sum_j \tau_j$ , где гравитационные задержки в поле тяготения Земли  $\tau_{\oplus}$  и  $j$ -й планеты  $\tau_j$  имеют вид

$$\tau_{\oplus} = (1 + \gamma) \frac{GM_{\oplus}}{c^3} \ln \frac{|\vec{r}_1| + \vec{k} \cdot \vec{r}_1}{|\vec{r}_2| + \vec{k} \cdot \vec{r}_2},$$

$$\tau_j = (1 + \gamma) \frac{GM_j}{c^3} \ln \frac{|\vec{d}_{1j}| + \vec{k} \cdot \vec{d}_{1j}}{|\vec{d}_{2j}| + \vec{k} \cdot \vec{d}_{2j}} + (1 + \gamma)^2 \frac{G^2 M_j^2}{c^5} \frac{\vec{b} \cdot (\vec{e}_{1j} + \vec{k})}{(|\vec{d}_{1j}| + \vec{k} \cdot \vec{d}_{1j})^2},$$

где  $GM_{\oplus}$ ,  $GM_j$  — геоцентрическая и планетоцентрические постоянные гравитации,  $\vec{d}_{1j}$ ,  $\vec{d}_{2j}$  — планетоцентрические векторы 1-го и 2-го пунктов, соответственно,  $\vec{e}_{1j}$  — единичный вектор.

Полная задержка с учетом влияния земной атмосферы  $\delta t_{a_i}$ , а также геофизических и инструментальных эффектов  $\delta \tau(t_1, i)$ , равна

$$\tau = (t_2 - t_1) = \tau_v + (\delta t_{a_2} - \delta t_{a_1}) + \delta t_{a_1} \frac{\vec{k} \cdot (\vec{v}_2 - \vec{v}_1)}{c} + \sum_n \delta \tau_n(t_1, i). \quad (2)$$

Все векторы и скалярные величины, входящие в формулы (1)–(2), вычисляются на момент  $t_1$ , когда волновой фронт достигает 1-го пункта. Кроме того, векторы, определенные в ITRS ( $\vec{r}_i, \vec{b}, \vec{v}_i$ ), должны быть отнесены к системе ICRS путем линейного преобразования вида

$\vec{r}_{ICRS} = [T] \cdot \vec{r}_{ITRS}$ , где матрица трансформации  $[T]=[RPNSW]$  равна произведению следующих матриц:

$[R] = \mathcal{R}_1(\omega_1)\mathcal{R}_2(\omega_2)\mathcal{R}_3(\omega_3)$  — матрица полного вращения системы ITRS вокруг ее мгновенных осей, как дополнение или альтернатива всем остальным вращениям,

$[P] = \mathcal{R}_3(\zeta)\mathcal{R}_2(-\theta)\mathcal{R}_3(z)$  — матрица прецессии,

$[N] = \mathcal{R}_1(-\epsilon)\mathcal{R}_3(\Delta\psi)\mathcal{R}_1(\epsilon + \Delta\epsilon)$  — матрица нутации,

$[S] = \mathcal{R}_3(-gst)$  — матрица спина (вращения вокруг оси  $x_3$ ),

$[W] = \mathcal{R}_1(y_p)\mathcal{R}_2(x_p)$  — матрица движения полюса.

В этих выражениях ортогональные матрицы вращений  $\mathcal{R}_j(\phi)(j = 1, 2, 3)$  обеспечивают поворот правосторонней прямоугольной системы координат вокруг ее осей  $X_j$  на положительный угол  $\phi > 0$  против часовой стрелки, если смотреть от положительного конца этих осей к их началу [4]:

$$\mathcal{R}_1(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix},$$

$$\mathcal{R}_2(\phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix},$$

$$\mathcal{R}_3(\phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Для вычисления частных производных от функции линейной задержки  $c\tau(t, p)$  по параметрам  $p$  и времени  $t$  используется упрощенный вид формулы (1):

$$c\tau(t, p) = -(\vec{k} \cdot \vec{b})(1 - h) - (\vec{V} \cdot \vec{b})/c + c \sum_n \delta\tau_n(t, p), \quad (3)$$

откуда имеем

$$c \frac{\partial \tau}{\partial p} = -\frac{\partial \vec{k}}{\partial p} \cdot \vec{b}_* - \frac{\partial \vec{b}}{\partial p} \cdot \vec{k}_* + c \sum_n \frac{\partial \delta\tau_n(t, p)}{\partial p}, \quad (4)$$

где  $\vec{k}_* = \vec{k}(1 - h) + \vec{V}/c$ ,  $\vec{b}_* = \vec{b}(1 - h) - (\vec{V} + \vec{v})(\vec{k} \cdot \vec{b})/c$  — скорректированные векторы источника и базы,  $h = \vec{k} \cdot (\vec{V} + \vec{v})/c$  — скаляр.

Скорость изменения задержки вычисляется по простейшей формуле численного дифференцирования:

$$c\varrho = c \frac{\partial \tau}{\partial t} = \frac{c}{2\Delta t} [\tau(t_1 + \Delta t, p) - \tau(t_1 - \Delta t, p)], \quad (5)$$

где  $\Delta t$  — приращение времени (регулируемый параметр).

Частные производные скорости изменения задержки  $c\varrho(t, p)$  по параметрам  $p$  равны

$$c \frac{\partial \varrho}{\partial p} = c \frac{\partial}{\partial p} \left( \frac{\partial \tau}{\partial t} \right) = c \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial \tau}{\partial p} \right) = \frac{c}{2\Delta t} \left[ \left( \frac{\partial \tau}{\partial p} \right)_{t+\Delta t} - \left( \frac{\partial \tau}{\partial p} \right)_{t-\Delta t} \right]. \quad (6)$$

Все вычисления выполняются в единой размерности — метрах. Поскольку в файлах данных MARK-III DBH измеренная временная задержка  $\tau_*$  выражена в  $[ns] = 10^{-9}[s]$ , а скорость ее изменения  $\varrho_*$  в  $[ps/s] = 10^{-12}$ , то для их представления в единой размерности используются формулы:  $c\tau = c\tau_*/10^9$ ,  $c\varrho = c\varrho_*/10^{12}\Omega$ , где  $c = 299792458 [m/s]$  — скорость света,  $\Omega = 1/86400 [s^{-1}]$  — угловая скорость вращения Земли.

В формулах (3)–(4) векторы  $\vec{k}$  и  $\vec{b}$  определены в небесной системе координат ICRS, поэтому  $\vec{k} = (\cos \delta \cos \alpha, \cos \delta \sin \alpha, \sin \delta)$ ,  $\vec{b} = T\vec{b}_0$ , где  $\vec{b}_0 = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1)$  — вектор базы в земной системе ITRS,  $T$  — указанная выше матрица трансформации. В связи с этим, частные производные вектора  $\vec{k}$  вычисляются только по координатам источника  $\alpha, \delta$  и параметрам его структуры, а производные вектора  $\vec{b}$  равны

$$\frac{\partial \vec{b}}{\partial p} = \frac{\partial T}{\partial p} \vec{b}_0 + T \frac{\partial \vec{b}_0}{\partial p}, \quad (7)$$

где

$$\frac{\partial T}{\partial p} = \frac{\partial R}{\partial p} PNSW + R \frac{\partial P}{\partial p} NSW + RP \frac{\partial N}{\partial p} SW + RPN \frac{\partial S}{\partial p} W + RPNS \frac{\partial W}{\partial p}.$$

Момент наблюдений  $t_1$  регистрируется в скачкообразной шкале координированного времени UTC, поэтому он должен быть выражен сначала в непрерывной шкале земного атомного времени TT (Terrestrial Time)

$$TT = UTC + (TAI - UTC) + 32^s.184,$$



совмещенной на эпоху 1977 Jan. 1, 0<sup>h</sup> TAI (MJD=43144.0) со шкалой употреблявшегося ранее эфемеридного времени. Затем, согласно IERS Conventions, необходимо перейти к шкале координатного геоцентрического времени TCG (Time Coordinate for the Geocentric system) по формуле

$$TCG = TT + L_G \cdot (MJD - 43144.0) \cdot 86400^s,$$

где  $L_G = 6.969290136 \cdot 10^{-10} = 1 - d(TT)/d(TCG)$  — масштабный множитель, который согласно ОТО означает, что время в геоцентре течет быстрее, чем на поверхности Земли, вследствие почти постоянной разности гравитационных потенциалов.

Однако, переход к шкале времени TCG влечет за собой соответствующее изменение линейного масштаба, и в формуле (1) нужно использовать геоцентрические векторы  $\vec{r}_{TCG} = \vec{r}_{TT}(1 + L_G)$ . Чтобы этого избежать, IERS Conventions (2000) (гл. 12, с. 1) рекомендует вычислять задержку  $c\tau$  в шкале времени TT, а затем редуцировать ее в шкалу TCG по формуле  $c\tau_{TCG} = c\tau_{TT}(1 + L_G)$ . При этом все геоцентрические координаты, определяемые из анализа таких задержек, оказываются автоматически отнесенными к мерам длины, соответствующим шкале времени TCG.

Аналогичная ситуация возникает при вычислении барицентрических эфемерид тел Солнечной системы. Для сохранения постоянства скорости света и устранения дополнительного масштабирования барицентрических векторов  $\vec{R}_j$  необходимо пользоваться шкалой времени TCB, которая связана с земным временем TT соотношением

$$TCB = TT + L_B \cdot (MJD - 43144.0) \cdot 86400^s + \vec{V} \cdot (\vec{R}_i - \vec{R})/c^2 + P,$$

где  $L_B = 1.55051976772 \cdot 10^{-8} = 1 - d(TT)/d(TCB)$  — масштабирующий множитель;  $\vec{V}$ ,  $\vec{R}$ ,  $\vec{R}_i$  — барицентрические векторы скорости геоцентра, его положения и положения наземной станции, соответственно;  $P$  — сумма периодических членов. К счастью, третий член этой формулы, зависящий от координат станции, не превышает  $2 \cdot 10^{-6} s$ , и поэтому им можно пренебречь. Эффект периодических членов  $P$  может достигать 1.6 мсек. Наиболее точно они вычисляются с помощью модели FBL ([24], гл. 11), но можно пользоваться и приближенной формулой [5], с. 657:

$$P = 0^s \cdot 0.001658 \sin(g + 0.0167 \sin g) / 86400^s,$$

где  $g = (357^\circ.528 + 35999^\circ.050t)2\pi/360^\circ$  — средняя аномалия Земли,  $t = (TT - 51544.5)/36525$  — время от эпохи J2000.0 в юлианских столе-

тиях. С точностью 0.1 мм оба алгоритма приводят к одним и тем же разностям ( $O - C$ ).

Поскольку вращение Земли происходит вокруг геоцентра, то при вычислении матрицы трансформации  $T$  используется шкала времени TCG, а при вычислении эфемерид планет — шкала TCB.

## 2.2. Основные априорные данные

### 2.2.1. Опорные системы

Априорные координаты РСДБ-станций и скорости их изменения берутся из нового опорного каталога ITRF2000 (<http://lareg.ensg.igu.fr/ITRF/ITRF2000/results/ITRF2000.VLBI.SSC>), а координаты внегалактических радиоисточников — из каталога ICRF-Ext.1 [6] (<http://hpiers.obspm.fr/webiers/results/icrf/icrfext1rsc>). В экспериментальных вычислениях могут использоваться любые другие опорные каталоги.

При вычислениях геометрической задержки и приливных деформаций Земли используются фундаментальные эфемериды DE403/LE403 для Солнца, Юпитера и Сатурна с интервалом 0.5 суток, а Земли и Луны — 0.2 суток.

В качестве опорной системы ПВЗ (координаты полюса  $x_p, y_p$ , всемирное время UT1–UTC, продолжительность суток LOD — отклонение от 86400 сек TAI, поправки  $\Delta\psi, \Delta\epsilon$  к модели нутации IAU-1980) используются ежесуточные ряды IERS(EOP)C04 (<http://hpiers.obspm.fr/eop-pc>) или NEOS (<http://maia.usno.navy.mil/ser7>). Аргументом этих рядов является шкала времени UTC, а интерполяция осуществляется методом Лагранжа по заданному количеству соседних точек (<http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/models/interp.f>). При этом из табличных значений всемирного времени UT1–UTC предварительно исключаются эффекты твердотельных приливов с периодами до 35 суток [7] (<http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/models/starot>), которые после интерполяции прибавляются к значениям UT1–UTC на момент наблюдений. Кроме того, к интерполированным значениям UT1 и координат полюса прибавляются близсуточные вариации, вызванные глобальным динамическим приливом в океане и рассчитанные по моделям Рэя (R. Ray) [2], Гипсона (J. Gipson) [8] или новой, более совершенной, модели Рэя ([24], гл. 8).

### 2.2.2. Прецессия и нутация Земли

Для вычисления углов прецессии используются разложения Лизке (J.Lieske) ([2], с. 22):

$$\begin{aligned}\zeta_A &= 2306''.2181t + 0''.30188t^2 + 0''.017998t^3, \\ \theta_A &= 2004''.3109t - 0''.42665t^2 - 0''.041833t^3, \\ z_A &= 2306''.2181t + 1''.09468t^2 + 0''.018203t^3, \\ \epsilon_A &= 84381''.448 - 46''.8150t - 0''.00059t^2 + 0''.001813t^3,\end{aligned}$$

где  $t$  должно быть выражено в юлианских столетиях от момента наблюдений до фундаментальной эпохи J2000.0. При этом, однако, возникают некоторые трудности при вычислении производных матрицы прецессии [P] по общепринятым параметрам — лунно-солнечная прецессия в долготе  $p$  и прецессия от планет  $q$  на эпоху J2000.0, которые связаны с не зависящими от времени членами первых производных приведенных выше углов Ньюкомба следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}\dot{\theta}_A &= p \sin \epsilon_A = 2004''.3109, \\ \dot{\zeta}_A &= \dot{z}_A = (p \cos \epsilon_A - q)/2 = 2306''.2181.\end{aligned}$$

Используя эти соотношения, по правилу дифференцирования сложной функции находим

$$\frac{\partial P}{\partial p} = \frac{\partial P}{\partial z_A} \frac{\partial z_A}{\partial p} + \frac{\partial P}{\partial \dot{\theta}_A} \frac{\partial \dot{\theta}_A}{\partial p}, \quad \frac{\partial P}{\partial q} = \frac{\partial P}{\partial z_A} \frac{\partial z_A}{\partial q},$$

где

$$\begin{aligned}\frac{\partial P}{\partial z_A} &= \frac{\partial \mathcal{R}_3(\zeta_A)}{\partial \zeta_A} \mathcal{R}_2(-\theta_A) \mathcal{R}_3(z_A) \frac{\partial \zeta_A}{\partial \zeta_A} + \mathcal{R}_3(\zeta_A) \mathcal{R}_2(-\theta_A) \frac{\partial \mathcal{R}_3(z_A)}{\partial z_A} \frac{\partial z_A}{\partial z_A}, \\ \frac{\partial P}{\partial \dot{\theta}_A} &= \mathcal{R}_3(\zeta_A) \frac{\partial \mathcal{R}_2(-\theta_A)}{\partial \theta_A} \mathcal{R}_3(z_A) \frac{\partial \theta_A}{\partial \theta_A},\end{aligned}$$

и кроме того  $\partial z_A / \partial p = \cos \epsilon_A / 2$ ,  $\partial \dot{\theta}_A / \partial p = \sin \epsilon_A$ ,  $\partial z_A / \partial q = -1/2$ ,  $\partial \zeta_A / \partial \dot{\zeta}_A = \partial z_A / \partial \dot{z}_A = \partial \theta_A / \partial \dot{\theta}_A = t$ .

Для вычисления астрономической нутации можно использовать шесть различных моделей: 1) IAU(1980) (J. Wahr) (<http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/models/clastransf.f>), 2) IAU(1996), полученная в IERS в 2000 г. путем уточнения модели IAU(1980) по данным наблюдений и ее согласования с IERS Conventions (1996) ([11](http://hpiers.</a></p>
</div>
<div data-bbox=)

obspm.fr/eop-pc/models/cepiers96.f), 3) KSV(1996) (Т. Herring) [2], 4) МНВ(2000) (Р. Mathews, В. Buffett, Т. Herring), разработанная в 2000 г. (версия 31.08.2001), 5) МНВ(2000ft), полученная из предыдущей путем уточнения нескольких долгопериодических членов (версия 27.08.2001) (<http://bowie.mit.edu/~tah/mhb2000/>) и модель IAU(2000A), утвержденная последней Генеральной ассамблеей МАС и рекомендуемая IERS Conventions (2000).

При использовании нутации IAU(1980) учитываются ее поправки по данным опорного ряда ПВЗ. Для остальных моделей эти поправки не используются. Модели IAU(1980) и IAU(1996) не содержат поправок за геодезическую нутацию ([2], с. 37), поэтому модель IAU(1996) исправлена за этот эффект, а модель IAU(1980) оставлена без изменений. Модели IAU(1996) и KSV(1996) учитывают стандартное смещение небесного эфемеридного полюса СЕР по отношению к полюсу, заданному системой ICRF на эпоху J2000.0, равное  $\Delta\psi = -43.1mas$ ,  $\Delta\epsilon = -5.1mas$  (<http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/concistency>). В пакете QUASAR предусмотрен учет этого смещения для всех моделей за исключением IAU(1980), а также имеется опция, в которой учитывается дополнительное смещение каждой модели в виде полинома 4-й степени:  $\delta\psi = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 [mas]$ ,  $\delta\epsilon = b_0 + b_1t + b_2t^2 + b_3t^3 + b_4t^4 [mas]$ , где  $t$  — время от эпохи январь 1, 0<sup>h</sup> UTC 1980 г. (MJD=44239.0 UTC), считаемое в десятках тысяч дней UTC. Параметры этих трендов представлены в таблице 1. Они определены методом наименьших квадратов из сравнения всех указанных выше моделей нутации с опорным рядом IERS(EOP)C04 за 1980-2000 гг. Там же представлены СКО отклонений всех моделей от их трендов. Веса всех наблюдений принимались одинаковыми. На рисунке 1, для примера, показаны результаты такого сравнения для самой новой модели IAU(2000A). Данные таблицы 1 и рисунок 1 убедительно показывают, что в настоящее время ни одна модель нутации Земли не согласуется с достаточной точностью с наблюдениями. Кроме наличия дополнительных трендов, значения СКО в таблице 1 значительно больше оценок точности ряда IERS(EOP)C04 в случайном отношении. В связи с этим, служба IERS рекомендует при использовании любой из указанных выше моделей нутации (NUT), конечный результат представлять в виде поправок к модели IAU(1980) по формуле: " $\Delta$ IAU(1980) =  $\Delta$ NUT + IAU(1980) – NUT".

Отличительной особенностью всех современных моделей нутации, созданных после 1980 г., является явное присутствие в них свободной

Таблица 1. Дополнительные тренды теоретических нутаций

| Нутация     | $a_0, b_0$ | $a_1, b_1$ | $a_2, b_2$ | $a_3, b_3$ | $a_4, b_4$ | СКО  |
|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------|
| IAU(1996)   | -3.136     | +32.296    | -104.795   | +132.499   | -56.662    | 0.78 |
|             | +0.720     | -3.785     | +5.654     | -5.248     | +3.973     | 0.37 |
| KSV(1996)   | -3.855     | +32.989    | -103.833   | +134.142   | -60.011    | 0.81 |
|             | +0.614     | -6.066     | +19.804    | -30.590    | +18.481    | 0.33 |
| МНВ(2000)   | -3.976     | +22.739    | -69.974    | +93.469    | -46.066    | 0.76 |
|             | +2.883     | -8.299     | +20.035    | -19.745    | +6.919     | 0.33 |
| МНВ(2000ft) | -4.276     | +25.306    | -68.347    | +72.293    | -26.339    | 0.76 |
|             | +2.759     | -7.955     | +24.069    | -32.784    | +16.478    | 0.33 |
| IAU(2000A)  | -3.976     | +22.739    | -69.974    | +93.469    | -46.066    | 0.76 |
|             | +2.883     | -8.299     | +20.035    | -19.745    | +6.919     | 0.33 |

нутации ядра FCN (Free Core Nutation) в виде колебания с периодом  $P_0$ , равным приблизительно 430 средних солнечных суток. Это колебание проявляется в среднесуточных оценках нутационных компонент  $\Delta\psi$  и  $\Delta\epsilon$  и представляет собой трансформацию в область низких частот обратной свободной нутации ядра (точнее — нутации мантии и земной коры под действием свободных колебаний ядра) с близсуточной частотой  $f_0 < 0$ , поэтому  $P_0 = -[(1 + f_0)r]^{-1}$ , где  $r = 1.002737909$  — коэффициент перевода всемирного времени в звездное.

В теории нутации собственная частота  $f_0$  имеет особо важное значение, так как именно она определяет передаточную функцию, с помощью которой вычисляются резонансные эффекты для всех остальных гармоник астрономической нутации. В модели IAU(1996) этот период принят равным 433.0 дней, в KSV(1996) — 430.0665 дней, а в моделях МНВ(2000), МНВ(2000ft) и IAU(2000A) — 430.2082 дней. Кроме некоторой неопределенности периода, другая особенность FCN состоит в изменчивости ее амплитуды и фазы, которая объясняется воздействием на ядро внутренних электромагнитных сил и поверхностных геофизических явлений, связанных, в основном, с глобальной динамикой атмосферы и океана. Таким образом, здесь мы имеем дело с ситуацией, аналогичной свободному движению полюсов, и необходимостью постоянного мониторинга обоих этих явлений. В новейшей модели IAU(2000A) параметры нутации ядра согласованы с наблюдениями до 1 июня 2001 г. Эта нутация представлена на рис. 2 с экстраполяцией на

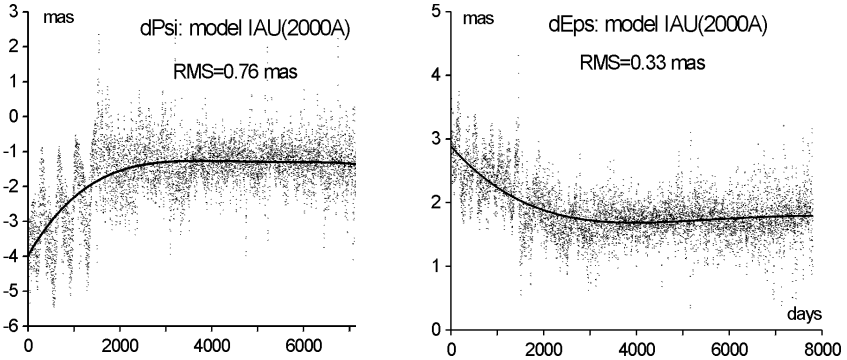


Рис. 1. Разности наблюдаемой нутации (ряд IERS(EOP)C04) и нутационной модели IAU(2000A) после исключения стандартного смещения небесного эфемеридного полюса СЕР. Сплошная линия — дополнительный тренд из таблицы 1. Слева — нутация в долготе, справа — в наклонности. Начальная эпоха — январь 1,  $0^h$  UTC 1980 г. (MJD=44239.0 UTC).

1000 суток вперед. Однако эта экстраполяция вряд ли точна, поэтому ее уточнение будет регулярно производиться службой IERS. Изучение этого колебания показывает, что оно имеет широкополосный спектр, и для его прогноза могут использоваться самые разные стохастические методы, включая метод СКК [16]. Поскольку глава 5 IERS Conventions (2000) еще не завершена, изложенный алгоритм учета прецессии и нутации может измениться.

### 2.3. Структурная задержка

Астрофизические исследования последних лет показывают, что на субмиллисекундном уровне углового разрешения многие радиоисточники не являются точечными, а имеют довольно сложное распределение радиояркости (изображение)  $I(P, \omega, t)$  в точках  $P(x, y)$  плоскости  $(x, y)$ , касательной к небесной сфере в опорной точке источника  $P_0(0, 0)$  с известными координатами в системе ICRS (см. рис. 3).

Это распределение зависит от времени  $t$  и циклической (круговой) частоты принимаемого излучения  $\omega = 2\pi f = 2\pi c/\lambda$ , где  $c$  — скорость света,  $\lambda$  — длина волны,  $f$  — так называемая линейная частота, и опре-

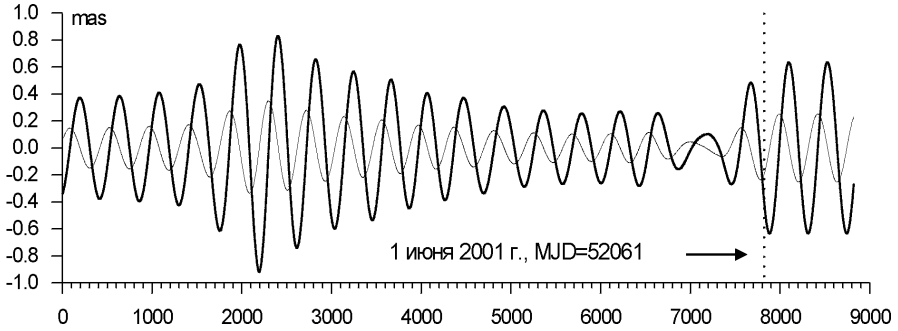


Рис. 2. Свободная нутация ядра по данным модели IAU(2000A). Жирная кривая — dPsi, тонкая — dEps.

деляет через преобразование Фурье измеряемую комплексную функцию видности [11]

$$V(\vec{b}, \omega, t) = \iint I(P, \omega, t) \exp \left\{ -i \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{b} \cdot \vec{k}) \right\} dx dy,$$

где  $\vec{b}$  — вектор базы интерферометра в системе ICRS,  $\vec{k}$  — единичный геоцентрический вектор направления на точку  $P$  в той же системе,  $(\vec{b} \cdot \vec{k})$  — скалярное произведение этих векторов, интегрирование ведется по всей области изображения источника.

Вводя единичный геоцентрический вектор  $\vec{k}_0$ , направленный в опорную точку изображения  $P_0$  и обозначая  $\vec{s} = \vec{k} - \vec{k}_0$  — вектор в плоскости  $(x, y)$ , соединяющий опорную и текущую точки и ортогональный вектору  $\vec{k}_0$ , имеем

$$V(\vec{b}, \omega, t) = \exp \left\{ -i \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{b} \cdot \vec{k}_0) \right\} \iint I(P, \omega, t) \exp \left\{ -i \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{b} \cdot \vec{s}) \right\} dx dy,$$

откуда по формуле  $\phi = \phi_g + \phi_s = \arg(V)$  находим геометрическую и структурную компоненты фазы функции видности:

$$\phi_g = -2\pi(\vec{b} \cdot \vec{k}_0)/\lambda, \quad \phi_s = \arctan(-Z_s/Z_c),$$

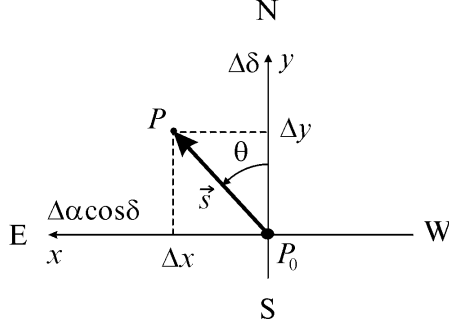


Рис. 3. Система координат в пространстве изображений.

где

$$Z_{\{c\}} = \iint I(P, \omega, t) \begin{Bmatrix} \sin \\ \cos \end{Bmatrix} (2\pi R) dx dy,$$

и введено обозначение безразмерной функции:  $R = (\vec{b} \cdot \vec{s})/\lambda$ .

Если распределение радиояркостности  $I(P, \omega, t)$  известно, то полная задержка на данной базе вычисляется по формуле [9], [10], [11]:

$$\tau = \partial\phi/\partial\omega = \partial\phi_g/\partial\omega + \partial\phi_s/\partial\omega = \tau_g + \tau_s,$$

где

$$\tau_g = -\frac{1}{c}(\vec{b} \cdot \vec{k}_0),$$

$$\tau_s(\omega) = \left( Z_s \frac{\partial Z_c}{\partial \omega} - Z_c \frac{\partial Z_s}{\partial \omega} \right) / (Z_c^2 + Z_s^2). \quad (8)$$

Производные по времени могут быть получены по формуле (5).

Структурная задержка является нелинейной функцией частоты и может быть вычислена по формуле (8) для сетки частот  $\omega_i$ , которая соответствует каналам записи в обеих синтезируемых полосах системы регистрации MARK-III — X и S. Полоса X занимает частоты  $f$  от 8.2 до 8.6 GHz и, обычно, делится на 8 каналов, а полоса S имеет 6 каналов между частотами  $f = 2.2 \div 2.3$  GHz. Поскольку сетка частот в обоих каналах тоже неравномерная, то в пакете QUASAR структурная задержка (8) вычисляется только для центральной частоты каждого



канала  $f_X$  и  $f_S$ . Если прием, как обычно, двухполосный, то окончательное значение структурной задержки вычисляется по формуле:  $\tau_s(X \& S) = \tau_s(X) + 0.077293 [\tau_s(X) - \tau_s(S)]$ .

Благодаря любезности д-ра А. Фэя (Alan Fey, [afey@usno.navy.mil](mailto:afey@usno.navy.mil)), мы располагаем данными о распределении радиояркости 269 источников из каталога ICRF-Ext.1. Эти данные получены из VLBA-наблюдений и являются результатом моделирования изображений в виде набора  $\delta$ -функций, полученных методом CLEAN:

$$I(P_k) = F_k \delta(x - x_k, y - y_k),$$

где  $F_k$  — интенсивность  $k$ -й компоненты  $P_k$  структуры источника в янских [Ян],  $x_k, y_k$  — ее координаты в *mas* относительно центральной наиболее яркой компоненты  $P_0(0, 0)$ . Отсюда имеем

$$Z_{\left\{ \begin{smallmatrix} s \\ c \end{smallmatrix} \right\}} = \sum_k F_k \left\{ \begin{array}{c} \sin \\ \cos \end{array} \right\} (2\pi R_k),$$

где  $R_k = (\vec{b} \cdot \vec{s}_k) / \lambda$ ,  $\vec{s}_k$  — вектор направления на  $k$ -ю компоненту из начала координат  $P_0$ . Из этого выражения легко получить необходимые для формулы (8) производные:

$$\partial Z_{\left\{ \begin{smallmatrix} s \\ c \end{smallmatrix} \right\}} / \partial \omega = \frac{\lambda}{c} \sum_k F_k R_k \left\{ \begin{array}{c} \cos \\ -\sin \end{array} \right\} (2\pi R_k).$$

Существенным недостатком изложенного метода является нелинейность зависимости фазы и задержки от частоты. Однако основная проблема состоит в том, что распределение радиояркости многих источников довольно быстро меняется со временем, поэтому карты этих распределений, строго говоря, нужно обновлять на каждый момент наблюдений, что практически невозможно. В этом отношении более удобен метод параметризации структурной задержки [10]. Для этого достаточно использовать простейшую двухкомпонентную модель структуры источника, зависящую от трех параметров, которые можно периодически уточнять из обработки РСДБ-наблюдений. Такой подход возможен даже при полном отсутствии априорных данных о структуре источника.

Представим реальное распределение радиояркости источника на плоскости  $(x, y)$  как набор двух  $\delta$ -функций  $F_0(0, 0)$  и  $F_n(x_n, y_n)$  в точках  $P_0$  и  $P_n$ , соответственно, одна из которых  $F_0$  представляет центральное наиболее яркое ядро источника, а другая — суммарную яркость всех

остальных  $\delta$ -функций:  $F_n = \sum_{k=1}^n F_k$ , поэтому общая яркость источника равна  $F = F_0 + F_n$ . Введем параметр  $h = F_n/F_0 < 1$ , тогда согласно вышеизложенной теории можно получить [11]

$$\tau_s = \frac{2\pi h(1-h)}{\omega(1+h)} \frac{[1 - \cos(2\pi R)]R}{[h^2 + 2h \cos(2\pi R) + 1]}, \quad (9)$$

где  $R = (\vec{b} \cdot \vec{s})/\lambda$ ,  $\vec{s}$  — вектор между компонентами структуры в картинной плоскости, направленный от  $P_0$  к  $P_n$ .

Параметрами модели (9) кроме  $h$  являются еще и проекции на оси  $x, y$  углового расстояния между обеими компонентами  $\Delta x = \Delta\alpha \cos \delta$  и  $\Delta y = \Delta\delta$  или эквивалентные им величины — расстояние между компонентами  $s = (\Delta x^2 + \Delta y^2)^{1/2}$  и позиционный угол  $\theta = \arctan(\Delta x/\Delta y)$  (см. рис. 3). Очевидно, что эта модель зависит также от частоты излучения  $\omega$ , поэтому ее можно использовать как в X, так и в S полосе записи. Производная по времени  $\dot{\tau}_s$  может быть получена численно по формуле (5).

## 2.4. Геофизические эффекты

Хотя практически все геофизические эффекты действуют глобально, но в редукционных вычислениях учитываются лишь их локальные проявления в топоцентрической горизонтальной системе координат NEU. Ось U этой системы направлена по местной нормали к земному сфероиду, оси N и E лежат в плоскости местного горизонта и направлены, соответственно, в точки севера и востока. Связь между геоцентрической и топоцентрической системами выражается формулой [12]  $\vec{r}_{TRS} = A\vec{r}_{NEU}$ , где матрица трансформации равна

$$A = \begin{bmatrix} -\sin B \cos L & -\sin L & \cos B \cos L \\ -\sin B \sin L & \cos L & \cos B \sin L \\ \cos B & 0 & \sin B \end{bmatrix} \quad (10)$$

и зависит от геодезической широты  $B$  и долготы  $L$  места, которые могут быть вычислены по известным прямоугольным координатам станции в системе TRS ([2], с. 12).

### 2.4.1. Полюсной прилив

Вращательная деформация упругой Земли под действием центробежных сил, возникающих при движении полюсов, вызывает смещение

точек земной поверхности в системе TRS  $\delta\vec{r} = A\delta\vec{s}$ , где смещение в NEU  $\vec{s} = (s_n, s_e, s_u)$  равно ([24], гл. 7, с. 12)

$$\begin{aligned} s_n &= -9 \cos 2B(m_1 \cos L + m_2 \sin L) [mm], \\ s_e &= 9 \sin B(m_1 \sin L - m_2 \cos L) [mm], \\ s_u &= -32 \sin 2B(m_1 \cos L + m_2 \sin L) [mm], \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} m_1(t) &= x_p(t) - \hat{x}_p(t), \\ m_2(t) &= -(y_p(t) - \hat{y}_p(t)), \end{aligned}$$

$x_p, y_p$  — координаты полюса, публикуемые IERS,  $\hat{x}_p, \hat{y}_p$  — координаты среднего полюса, которые необходимо из движения полюсов исключить и которые приближенно можно представить в виде линейного тренда ([24], с. 13)

$$\begin{aligned} \hat{x}_p &= -0.7 + 0.862(t - t_0) [mas], \\ \hat{y}_p &= 179.4 + 3.217(t - t_0) [mas], \end{aligned}$$

где  $t$  выражено в годах от эпохи  $t_0 = 1950.0$ .

#### 2.4.2. Океаническая и атмосферная нагрузки

Трехмерные смещения станций в системе NEU, возникающие вследствие переменной нагрузки на земную кору, вызванной океаническими приливами, вычисляются в соответствии с рекомендациями IERS Conventions (1996, 2000) ([2], с. 52–56, [24], гл. 7) с использованием обновленных данных об амплитудах и фазах 11 приливных волн, полученных д-ром Х.-Г. Шернеком (H.-G. Scherneck, Onsala Space Observatory, Швеция) практически для всех РСДБ-станций (<http://www.oso.chalmers.se/~hgs/olc>).

Аналогичные смещения станций вследствие вариаций атмосферного давления могут вычисляться в двух вариантах ([18], с. 24–25). В первом варианте вычисляются только вертикальные смещения  $\delta u = k(P - P_0)$ , где  $P$  — приземное барометрическое давление в момент наблюдений в миллибарах,  $P_0$  — опорное атмосферное давление для данной станции,  $k$  — коэффициент пропорциональности в м/mb. Для вычисления  $P_0$  имеются две опции: в одной из них оно вычисляется специальной процедурой как среднее по всем данным наблюдений, во второй используется стандартное давление  $P_0 = 1013.25 \exp(-H/8567)$ , где  $H$  — высота станции над уровнем земного сфероида в метрах. Благодаря

любезности д-ра Д. Макмиллана (Dan MacMillan, GSFC, USA), мы имеем коэффициенты пропорциональности  $k$ , полученные почти для всех РСДБ-станций из анализа РСДБ-наблюдений с помощью программного пакета CALC/SOLVE. Однако в приложении к главе 7 IERS Conventions (2000) [24] имеется файл, содержащий более точные значения этих коэффициентов, которые получены из анализа GPS-наблюдений. Когда станции GPS и РСДБ совпадают, используются именно эти значения, в противном случае — коэффициенты Макмиллана. Во втором варианте используются трехмерные смещения станций, вычисленные д-ром Х. Г. Шернеком и любезно предоставленные нам д-ром Р. Хаасом (R. Haas, OSO, Швеция). Они получены из анализа глобального распределения давления за период 1993–97 гг. Хотя такой подход, по-видимому, дает более точные результаты, он пока не применим к обработке текущих наблюдений из-за значительного запаздывания результатов анализа.

#### *2.4.3. Последледниковые поднятия*

Медленное восстановление земной коры, вдавленной в пластичную мантию под тяжестью огромных масс льда последнего оледенения, продолжается до сих пор и относится не только к фенно-скандинавской платформе, где ледник был наиболее мощным, но охватывает практически всю земную поверхность. Современная математическая модель этого явления, разработанная Пелтьером (W. Peltier, [14]), учитывает также сопутствующие изменения уровня Мирового океана и указывает на существование трехмерных смещений точек земной коры в системе NEU. Таблицу годовых скоростей этих смещений (достигающих нескольких мм/год) практически для всех действующих РСДБ-станций можно получить по адресу <ftp://maia.usno.navy.mil/pgr.model>. Однако, несмотря на доступность и, по-видимому, достаточную надежность этих данных, их учет, как правило, увеличивает дисперсию разностей ( $O - C$ ). Объясняется это тем, что медленные последледниковые поднятия уже учтены в вековых скоростях изменения координат станций, приведенных в каталоге ITRF, поскольку эти скорости получены не путем модельных расчетов, а из обработки длительных рядов наблюдений.

#### 2.4.4. Приливные деформации Земли

Вычисление приливных деформаций Земли осуществляется в строгом соответствии с теорией, изложенной в [24] (программа доступна по адресу `ftp: omaftp.omabe/dist/astro/dehant/IERS`). Эта программа реализует новую, более совершенную и точную, модель деформаций для неупругой Земли. Числа упругости Лява и Шида  $h, l$  представлены в комплексной форме, соответствующей фазовому запаздыванию приливов в мантии Земли, для суточных приливов учтена их зависимость от частоты, обусловленная резонансом со свободным близсуточным колебанием жидкого ядра.

Вычисленное таким образом полное приливное смещение представляет собой редукцию от "невозмущенной" (tide-free), ненаблюдаемой, поверхности Земли к "мгновенной наблюдаемой, поверхности. Однако, согласно резолюции XVIII Генеральной Ассамблеи Международной Ассоциации Геодезии координаты станций в опорной системе ITRF должны быть отнесены к некоторой "средней" (mean) или "наблюдаемой в среднем поверхности, свободной от периодической части приливов. Чтобы получить эту поверхность, нужно к невозмущенной поверхности прибавить так называемый "перманентный" зональный прилив с нулевой частотой, который в системе NEU имеет вид ([24], с. 65):

$$\begin{aligned}\Delta n &= [-0.1984 l_{20} + 0.0001 P_2(\sin \phi)] \sin 2\phi [m], \\ \Delta e &= 0, \\ \Delta u &= [-0.1984 h_{20} + 0.0004 P_2(\sin \phi)] P_2(\sin \phi) [m],\end{aligned}\tag{11}$$

где  $h_{20} = 0.6078, l_{20} = 0.0847$  — номинальные значения чисел Лява и Шида для потенциала второго порядка,  $P_2$  — обыкновенные полиномы Лежандра 2-го порядка. Это означает, что при редукционных вычислениях необходимо из полного приливного смещения станции исключать перманентный прилив (11).

Однако, благодаря определенной пластичности (текучести) мантии Земли на длительных интервалах времени, перманентный прилив неотделим от сложившейся равновесной фигуры Земли, поэтому хотя его и можно описывать формулами (11), но в них вместо упругих чисел Лява и Шида  $h_{20}, l_{20}$  необходимо использовать "вековые" числа  $h_s = 1.94, l_s = 0$ . Таким образом, "наблюдаемой в среднем" поверхностью Земли на самом деле является "невозмущенная" поверхность + "вековой" перманентный прилив. Это обстоятельство не создавало бы ни-

каких осложнений, если бы "упругий"перманентный прилив, вычисленный по формуле (11), всегда исключался из полного приливного смещения всеми обработчиками позиционных наблюдений. Но дело обстоит как раз наоборот — большинство из них этого не делает [15]. По этой причине геоцентрические координаты станций, зафиксированные во всех последних реализациях ITRF, относятся не к "наблюдаемой в среднем"поверхности, а к поверхности, смещенной относительно нее на величину фиктивного перманентного прилива (11). Этот вывод подтверждается непосредственными вычислениями. Если перманентный прилив (11) исключать из полного приливного смещения станций, то поправки их координат получаются совершенно неправдоподобными.

Чтобы результаты определения координат РСДБ-станций не противоречили другим определениям и опорным системам ITRF, в пакете QUASAR учитываются полные приливные смещения станций без исключения перманентного прилива (11). Однако имеется возможность уточнения как глобальных и локальных чисел Лява и Шида  $h_{20}, l_{20}$ , так и их "вековых"значений  $h_s, l_s$ .

## 2.5. Инструментальные и локальные эффекты

### 2.5.1. Антенный вынос

В радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами используются полноповоротные антенны различных диаметров от 9 м для передвижных и до 100 м для стационарных станций. Их монтажки также различны и делятся на 4 типа: альтазимутальные AZEL, экваториальные EQUA и горизонтальные X-YN и X-YE. На рис. 4 представлена обобщенная схема этих монтажек. Любая из монтажек имеет неподвижную ось вращения  $\vec{r}$ , которая покоится на фундаменте и поэтому жестко связана с телом Земли. Ее направление определено в локальной системе NEU. Вокруг этой оси антенна А может поворачиваться на любой угол в пределах  $\pm\pi$ . Всегда имеется и вторая подвижная ось (на рис. 4 она перпендикулярна плоскости чертежа в точке В), вокруг которой зеркало антенны А может поворачиваться на угол  $\pm\pi/2$ . В монтажках типа AZEL ось  $\vec{r}$  направлена в зенит (по нормали к земному сфероиду), EQUA — в полюс мира, X-YN — в точку севера, X-YE — в точку востока. Когда антенна направлена на источник вдоль вектора  $\vec{s}$ , то подвижная ось В оказывается компланарной волновому фронту FG, поэтому расстояние АВ от фазового центра антенны до оси

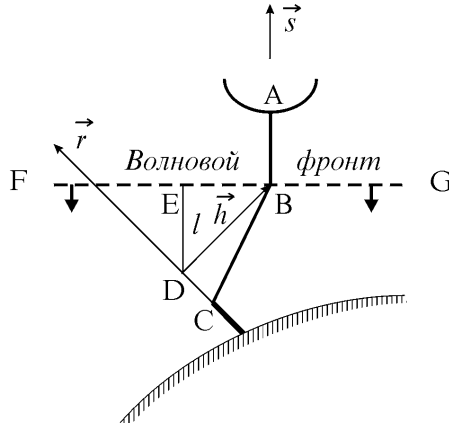


Рис. 4. Схема монтаровок антенн, используемых в РСДБ.

В фронт проходит всегда за одно и то же время. Эту задержку принято складывать с так называемой "кабельной" задержкой. Однако ось В меняет свое положение в пространстве, поэтому измеренную задержку необходимо редуцировать к некоторой неподвижной точке антенны. В качестве таковой выбирается точка D на неподвижной оси  $\vec{r}$ , которая находится на кратчайшем расстоянии от оси В (у основания перпендикуляра DB к обеим осям). Вектор  $\vec{h} = \overrightarrow{DB}$  называется антенным выносом (offset). При любых поворотах антенны этот вектор сохраняет свою длину  $h = |\vec{h}|$ . После прохождения оси В в момент  $T_B$  волновой фронт достигает опорной точки D в момент  $T_D = T_B + l/c$ , где  $l$  есть длина перпендикуляра DE.

Таким образом, задержка  $\tau$ , измеренная на двух пунктах РСДБ имеет вид  $\tau = \tau_0 - (l_2 - l_1)/c$ , где  $\tau_0$  — вычисленная задержка, относящаяся к прохождению одного и того же волнового фронта через опорные точки D обеих антенн. Из рис. 4 видно, что  $l = h \sin \theta$ , где  $\theta = (\vec{r} \wedge \vec{s})$  — угол между направлением основной оси монтаровки и видимым направлением на источник, которое равно геометрическому направлению, исправленному за локальную рефракцию и абберацию. Исключение составляет нестандартная монтаровка станции Ричмонд,

разрушенная ураганом в 1992 г., для которой принято

$$l = h(1 - \{\cos z \sin(0.6817256) + \sin z \cos(0.6817256)\} \times [\cos A \cos(0.0020944) - \sin A \sin(0.0020944)]^2)^{1/2}.$$

### 2.5.2. Ориентация и температурные деформации антенн

При больших значениях антенного выноса требуется более высокая точность ориентации обеих осей монтировки антенны. Например, при  $h = 10$  м погрешность в 1 мм возникает при ошибках ориентации около 20 угловых секунд.

IERS Conventions (2000) рекомендует также учитывать температурные деформации радиотелескопов. Наряду с теорией этого эффекта для разных типов антенн ([17], с. 26–29) сейчас имеются и необходимые данные о их конструкции ([24], гл. 7, файл `termal.dat`). Теория рекомендует учитывать запаздывание по фазе температуры антенны и ее фундамента по отношению к температуре наружного воздуха на 2 и 6 часов, соответственно. Чтобы учесть это запаздывание, в пакете QUASAR температура воздуха на всех станциях в течение суток аппроксимируется функцией:  $T = a_0 + a_1 t + a_2 \sin(2\pi t) + a_3 \cos(2\pi t)$ , где  $t$  — время в долях суток от начала наблюдений.

Оценки показывают, что влияние температурных деформаций телескопов на измеренную временную задержку может достигать  $10 ps$  при изменении температуры воздуха на  $\Delta T = T - T_0 = 10^\circ C$ . Однако выбор опорной температуры  $T_0$  остается неоднозначным. В пакете QUASAR в качестве  $T_0$  выбирается среднее значение температуры за весь период обрабатываемых наблюдений. На наш взгляд, было бы целесообразно зафиксировать в рекомендациях авторитетных международных организаций IERS и IVS правило выбора опорных значений температуры  $T_0$  и давления  $P_0$  воздуха для всех станций, входящих в земную систему координат ITRF, поскольку эти значения через температурные деформации телескопов и, соответственно, через деформации земной коры под действием атмосферной нагрузки заметно влияют на определение координат этих станций из наблюдений.

### 2.5.3. Атмосферная рефракция

При определении видимого направления на источник в горизонтальной системе NEU должна быть учтена суточная и годичная абerrация и рефракция. Для вычисления рефракции предусмотрено две



опции. Одна из них основана на стандартной формуле ([9], с. 42)  $\Delta E = 3.13 \cdot 10^{-4} \tan z_A$ , где  $z_A$  — исправленное за аберрацию зенитное расстояние источника, а другая — на более сложном и точном алгоритме, изложенном в [9], с. 42, и [10], с. 1428.

#### 2.5.4. Тропосферная задержка

Регулярная составляющая тропосферной задержки зависит от высоты источника над горизонтом и молекулярного состава воздуха вдоль луча зрения, включая распределение водяных паров. Эту задержку принято представлять в виде суммы двух компонент — "сухой" (dry) и "влажной" (wet). Поскольку "сухая" компонента тропосферы достаточно равномерно перемешана по всему земному шару и близка к гидростатическому равновесию, то для ее описания можно воспользоваться стандартной гидростатической моделью атмосферы, которая для задержки в зените дает оценку (формула Саастамойнена (Saastamoinen), [10], с. 1434; [24], гл. 9):

$$z_h = \frac{(0.0022768 \pm 0.0000005)P}{1 - 0.00266 \cos 2\phi - 0.00028H} [m],$$

где  $P$  — приземное барометрическое давление [mb],  $\phi$  — широта места,  $H$  — высота над уровнем моря в [km].

Хотя в настоящее время эта формула считается наиболее точной, в пакете QUASAR имеются еще две опции: формула Дэвиса (Davis J. et al., [19]):

$$z_h = \frac{0.0022768P}{1 - 0.00266 \cos 2\phi - 0.00028(0.9H + 7.3)} [m],$$

формула Трэйли (Tralli D., [20], Петров Л. Ю., [21]):

$$z_h = \frac{0.0227652P}{g - \frac{dg}{dH}(0.9H + 7.3)} [m].$$

В последнем выражении  $dg/dH = -2g_e/a_e = -3.066829 \cdot 10^{-6} s^{-2}$  — изменение с высотой ускорения силы тяжести на экваторе  $g_e = 9.780327 m/s^2$ ,  $a_e = 6378136.49 m$  — экваториальный радиус Земли,  $g$  — местное значение силы тяжести

$$g = g_e \frac{1 + 0.001931663 \sin^2 \phi}{\sqrt{1 - \varepsilon \sin^2 \phi}} + \frac{dg}{dH} H,$$

$\varepsilon = \sqrt{2/f - 1/f^2}$ ,  $f = 298.25642$  — обратная величина сжатия земного сфероида.

Влажная компонента тропосферной задержки в зените не поддается точному моделированию даже с привлечением наземных метеопараметров — давления, температуры и влажности воздуха, поэтому ее остается определять из самих РСДБ-наблюдений.

Зависимость тропосферной задержки от угла элевации  $e$  (высоты над горизонтом) выражается так называемой картирующей функцией (mapping function)  $m(e)$ . Для сухой и влажной компонент эти функции различны:  $m_h(e) \neq m_w(e)$ . Для вычисления этих функций без использования данных аэрологического зондирования IERS Conventions (2000) рекомендует следующие наиболее точные алгоритмы: Ifadis I, [22]; Herring T., [9]; Niell A., [23]. Кроме того, рекомендуется учитывать горизонтальные градиенты этих функций, имеющие важное значение при наблюдениях на малых углах элевации.

Таким образом, окончательное выражение для тропосферной задержки имеет вид

$$c\tau_{tr} = z_h m_h(e) + z_w m_w(e) + [g_n \cos a + g_e \sin a] m_g(e),$$

где  $a$  — геодезический азимут источника,  $g_n, g_e$  — подлежащие определению градиентные коэффициенты в направлении на север и восток, соответственно,  $m_g(e)$  — градиентная картирующая функция. В IERS Conventions (2000) (гл. 9) рекомендуются следующие выражения для этой функции: 1)  $m_g(e) = m_h(e) \cot(e)$ , 2)  $m_g(e) = m_w(e) \cot(e)$ , 3)  $m_g(e) = 1/(\sin e \tan e + 0.0032)$ .

### 2.5.5. Ионосферная задержка

Задержка радиосигнала в ионосфере является частотно-зависимой, поэтому она определяется непосредственно при корреляционной обработке сигналов, принятых одновременно в двух разных полосах частот — 8.2 ~ 8.6 GHz (X-band) и 2.2 ~ 2.3 GHz (S-band). Эта задержка и оценка ее средней квадратической ошибки приводятся в NGS-файлах данных наблюдений и используются без каких-либо изменений.

## 3. Настройка редуccionных вычислений

Редуccionные вычисления в пакете QUASAR выполняются программой `reduct.for`. Эта программа имеет несколько многовариантных

опций, выбор которых предоставляется пользователю. Для этой цели используются целочисленные, логические и действительные параметры, которым можно присваивать необходимые значения непосредственно на панели управления заданиями. Ниже приводится список таких параметров и их возможные значения. Буква D указывает на рекомендуемое значение по умолчанию. Ниже приводится список параметров настройки программы `reduct.for` по состоянию на 1.09.01:

- iLagr**: количество точек таблицы с каждой стороны момента наблюдений при интерполяции методом Лагранжа: 1, 2D, 3, ...;
- iNut**: модель нутации Земли: 0D — IAU(1980), 1 — IAU(1996), 2 — KSV(1996), 3 — MNB(2000), 4 — MNBft(2000), 5 — IAU(2000A);
- iOff**: сдвиг небесного эфемеридного полюса (СЕР) на эпоху J2000.0 относительно ICRF (используется только для `iNut>0`): 0D — стандартный сдвиг IERS, 1 — прибавляется дополнительный полиномиальный сдвиг (см. таблицу 1);
- iFcn**: свободная нутация ядра Земли: 0 — не учитывается, 1D — учитывается кроме модели IAU(1980);
- iHfv**: высокочастотные близсуточные вариации ПВЗ: 0 — не учитываются, 1 — модель Рэя из IERS Conventions (1996), 2 — модель Гипсона, 3D — новая модель Рэя из IERS Conventions (2000);
- iHfr**: альтернативный алгоритм учета близсуточных вариаций ПВЗ : 0D — не используется, 1 — используется (не реализован);
- iZdry**: сухая (гидростатическая) компонента тропосферной задержки в зените: 0D — формула Саастамойнена из IERS Conventions (2000), 1 — формула Дэвиса, 2 — формула Трэлли;
- iMdry**: картирующая функция для сухой (гидростатической) компоненты тропосферной задержки: 0D — Нилла, 1 — Херринга, 2 — Ифадиса (пока не реализована);
- iMwet**: картирующая функция для влажной компоненты тропосферной задержки: 0D — Нилла, 1 — Херринга, 2 — Ифадиса (пока не реализована);
- iMgrad**: градиентная картирующая функция: 0 —  $m_g(e) = m_h(e) \cot(e)$ , 1D —  $m_g(e) = m_w(e) \cot(e)$ , 2 —  $m_g(e) = 1/(\sin e \tan e + 0.0032)$ ;
- iEop**: опорный ряд ПВЗ: 0D — IERS(EOP)C04, 1 — NEOS;
- iRefP**: опорное давление воздуха: 0D — среднее значение за период обрабатываемых наблюдений, 1 — стандартное значение;
- iElev**: тропосферная рефракция: 0 — стандартная модель, 1D — уточненная модель Соверса и Фанселу;

**iDown**: умножение СКО наблюдений на  $\sec z_{max}$ , если  $z_{max} > 75^\circ$ : 0 — не используется, 1D — используется;  
**iCorOff**: поправки номинальных значений антенных выносов: 0D — не используется, 1 — используется;  
**iSecPM**: учет векового движения полюса при расчете центробежных деформаций земной коры: 0D — согласно рекомендации IERS Conventions (2000), 1 — согласно рекомендации [13], опция 1;  
**iStruct**: учет структурной задержки: 0D — не учитывается, 1 — многокомпонентная модель, 2 — двухкомпонентная модель;  
**iBand**: синтезируемая полоса: 0D — X-band, 1 — S-band, 2 — (S-X) dual-band;  
**iDelSour**: минимальное число наблюдений источников: 0D, 1, 2, ..., необходимое для их исключения из обработки;  
**iAtmLoad**: способ учета атмосферной нагрузки: 0D — локальные вертикальные смещения, 1 — глобальные 3-х мерные смещения;  
**bCon**: условие замыкания разностей ( $O-C$ ) для одновременных наблюдений на базах, образующих треугольник: .TRUE.D — используется, .FALSE. — не используется;  
**bRate**: вычисление скорости изменения задержки (пока не реализовано): .TRUE. — вычисляется, .FALSE.D — не вычисляется;  
**bAdd**: запись дополнительной информации в текстовый файл: .TRUE. — производится, .FALSE.D — не производится;  
**TimInt**: временной интервал, используемый при вычислении скорости изменения задержки: D=1.d0 sec;  
**SigAdd**: поправка к значению СКО задержки : D=0.d0 m;  
**PerH**, **PerL**: поправки номинальных значений чисел Лява и Шида для перманентного прилива: D=(0.d0, 0.d0).

#### 4. Перечень частных производных

Ниже приводится перечень частных производных от разностей ( $O-C$ ) по параметрам их линейной модели. Названия параметров даны в 8-и символьной кодировке текстового формата, в квадратных скобках указана их размерность.

**GAMMA**: PPN-параметр  $\gamma$  [rad];

**PREC-p**, **PREC-q**: постоянные лунно-солнечной прецессии  $p$  и прецессии от планет  $q$  [m/cen];

PREC-vt, PREC-vz: скорости изменения углов прецессии Ньюкомба–Андуайе ( $\dot{\theta}_A, \dot{z}_A$ ) [m/cen];  
 NUT-psi, NUT-eps: нутация в долготе и наклонности [m];  
 UT1-UTC: всемирное время [m];  
 POLE-x, POLE-y: координаты полюса [m];  
 GLOBL-h, GLOBL-l: поправки чисел Лява и Шида 2-го порядка [rad];  
 PERM-h, PERM-l: поправки чисел Лява и Шида для перманентного прилива [rad];  
 SOUR-ras, SOUR-dec: координаты радиоисточников в ICRS [m];  
 PERT-x0, PERT-y0, PERT-z0: углы поворота вокруг осей ITRS [m];  
 PERT-xt, PERT-yt, PERT-zt: вековые скорости этих углов [m/cen];  
 STRUCT-h, STRUCT-x, STRUCT-y: параметры двухкомпонентной модели структурной задержки [rad], [m], [m];  
 ATM-load: локальные коэффициенты реакции земной коры на атмосферную нагрузку [m/mb];  
 PGRFB-n, PGRFB-e, PGRFB-u: скорости послеледниковых поднятий в системе NEU [m/y];  
 LOCAL-h, LOCAL-l: локальные значения чисел Лява и Шида 2-го порядка [rad];  
 ANT-off: антенный вынос [m];  
 ZEN-wet: влажная компонента тропосферной задержки в зените [m];  
 GRWET-n, GRWET-e: коэффициенты горизонтального градиента влажной компоненты тропосферной задержки в направлении на север и восток, соответственно [m];  
 STAT-x, STAT-y, STAT-z: координаты станций в системе ITRS [m];  
 STAT-vx, STAT-vy, STAT-vz: скорости изменения координат в системе ITRS [m/y];  
 STAT-n, STAT-e, STAT-u: координаты станций в системе NEU [m];  
 STAT-vn, STAT-ve, STAT-vu: скорости изменения координат в системе NEU [m/y];  
 CLCK-off: рассинхронизация шкал времени [m].

Любые из перечисленных выше параметров, изменчивые в течение суток, допускают или полиномиальное, или стохастическое представление.

## 5. Заключение

Как следует из IERS Conventions (2000), процесс изменений редуционных алгоритмов и уточнения априорных данных будет, по-видимому, активно протекать и в дальнейшем. Однако конструктивные особенности пакета QUASAR позволяют вносить их довольно быстро и безболезненно без существенной перестройки пакета.

Пакет QUASAR создавался в условиях, когда большинство зарубежных публикаций за последние 10 лет оказались для нас недоступными, поэтому практически вся необходимая информация была получена или частным образом, или с помощью Internet. Авторы искренне признательны д-ру И. И. Кумковой, д-ру О. А. Титову и д-ру С. А. Клионеру за предоставленные отписки работ зарубежных авторов, а также д-ру А. Фею (USNO, США), д-ру Д. Макмиллану (GSFC, США), д-ру Х.-Г. Шернеку (OSO, Швеция), д-ру Р. Хаасу (OSO, Швеция) за пересылку необходимых данных, д-ру А. Т. Байковой за помощь в освоении методики учета структурной задержки, проф. В. А. Брумбергу за консультации по проблеме релятивистских эффектов в редуционных вычислениях, а также проф. Г. А. Красинскому и д-ру Н. И. Глебовой за помощь в вычислениях и контроле эфемерид DE403/LE403. Мы также благодарны д-ру Н. Зарраоа (Испания), предоставившему в наше распоряжение пакет Ossam, изучение которого помогло разработать наиболее оптимальную конструкцию программы `reduct.for` и пакета QUASAR в целом.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту 00-02-16690.

## Список литературы

- [1] McCarthy D. D. (ed.). IERS Standards (1992). IERS Technical Note, 1992, No. 13.
- [2] McCarthy D. D. (ed.). IERS Conventions (1996). IERS Technical Note, 1996, No. 21.
- [3] Eubanks T. M. A Consensus Model for Relativistic Effects in Geodetic VLBI. In Eubanks T. M. (ed.). Proceedings of the U.S. Naval Observatory Workshop on Relativistic Models for Use in Space Geodesy. USNO, 1991, pp. 55–80.
- [4] Mueller I. I. Spherical and Practical Astronomy as applied to Geodesy. Frederick Ungar Publishing Co., New York, 1969, pp. 41–43, 85
- [5] Астрономический Ежегодник на 2001 год. Институт прикладной астрономии РАН. СПб, 1998.
- [6] Gambis D. (ed.). First extension of the ICRF, ICRF-Ext.1, 1998 IERS Annual Report, Chapter VI, 1999, Obs. de Paris, pp. 83–128.
- [7] Yoder C. F., Williams J. G., Parke M. E. Tidal variation of Earth Rotation, *J. Geophys. Res.*, **86**, 1981, pp. 881–891.
- [8] Gipson J.M. Very long baseline interferometry determination of neglected tidal terms in high-frequency Earth orientation variation. *Journal of Geophysical Research*, **101**, No. B12, 1996, pp. 28051–28064.
- [9] Sovers O. J., Jacobs C. S. Observation Model and Parameter Partial for the JPL VLBI Parameter Estimation Software "MODEST"-1994. JPL Publication 83-39, Rev. 5.
- [10] Sovers O. J., Fanselow J. L., Jacobs C. S. Astrometry and geodesy with radio interferometry: experiments, models, results. *Reviews of Modern Physics*, **70**, No. 4, 1998.
- [11] Charlot P. Radio-Source Structure in Astrometric and Geodetic Very Long Baseline Interferometry. *The Astronomical Journal*, **99**, No. 4, 1990, pp. 1309–1326.
- [12] Машимов М. М. Геодезия. Теоретическая геодезия. Справочное пособие. М.: Недра, 1991.
- [13] Andersen P. N., Schuch H., Müller J. Explanatory Supplement to the Section on "The solid Earth pole tide effect on the geopotential" and

- "The site displacement caused by rotational deformation due to polar motion" of the IERS Conventions (1996). In H. Schuch (Ed.). Explanatory Supplement to the IERS Conventions (1996). Chapters 6 and 7. DGFI Report, No 71, München, 1999.
- [14] Peltier W. R. VLBI baseline variations from the ICE-4G model of postglacial rebound. *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 1995, pp. 465–468.
- [15] Mathews P. M. Explanatory Supplement to the Section on "Treatment of the Permanent Tide" of the IERS Conventions (1996). In H. Schuch (Ed.). Explanatory Supplement to the IERS Conventions (1996). Chapters 6 and 7. DGFI Report, No 71, München, 1999.
- [16] Губанов В. С. Обобщенный метод наименьших квадратов. Теория и применения в астрометрии. СПб: Наука, 1997.
- [17] Haas R., Nothnagel A., Schuh H., Titov O. Explanatory Supplement to the Section on "Antenna Deformation" of the IERS Conventions (1996). In H. Schuch (Ed.). Explanatory Supplement to the IERS Conventions (1996). Chapters 6 and 7. DGFI Report, No 71, München, 1999.
- [18] Gipson J. Explanatory Supplement to the Section "Atmospheric Loading" of the IERS Conventions (1996). In H. Schuch (Ed.). Explanatory Supplement to the IERS Conventions (1996). Chapters 6 and 7. DGFI Report, No 71, München, 1999.
- [19] Davis J. L., Herring T. A., Shapiro I. I., Rodgers A. E. E. and Elgered G. Geodesy by Radio Interferometry: Effects of Atmospheric Modelling Errors on Estimates of Baseline Length, *Radio Science*, **20**, No. 6, 1985, pp. 1593–1607.
- [20] Tralli D. M. Tropospheric path delays on estimation of geodetic baselines in the Gulf using the GPS. *Journal of Geophysical Research*, **97**, (B3), 1992, pp. 999–1007.
- [21] Петров Л. Ю. Вторичная обработка геодезических РСДБ наблюдений. II. Модель редукции. Сообщения ИПА РАН, N 75, 1995.
- [22] Ifadis I. I. The Atmospheric Delay of Radio Waves: Modeling the Elevation Dependence on a Global Scale. Technical Report No. 38L, Chalmers Univ. of Technology, Göteborg, 1986.
- [23] Niell A. E. Global Mapping Functions for the Atmospheric Delay of Radio Wave lengths, *J. Geophys. Res.*, **101**, 1996, pp. 3227–3246.
- [24] McCarthy D. D. IERS Conventions (2000), <http://maia.usno.navy.mil/conv2000>.



В. С. Губанов, И. Ф. Суркис

Обработка РСДБ-наблюдений: Программный пакет QUASAR. I. Редукция данных наблюдений.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **ИТЭХ**

---

Подписано к печати 2.04.2002 Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Печ.л. 2.2  
Уч.-изд.л. 2.2 Тираж 100 Заказ бесплатно

---

Отпечатано в типографии ПИЯФ РАН  
(188350 Ленинградская обл., г. Гатчина, Орлова роща).

Институт прикладной астрономии РАН, 197110, С.-Петербург, Ждановская ул., 8.