

# **АНАЛИЗ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ОШИБОК МАСШТАБА И ОРИЕНТИРОВКИ ПРИ ФОТОГРАФИЧЕСКИХ И ПЗС НАБЛЮДЕНИЯХ ГЛАВНЫХ СПУТНИКОВ САТУРНА, ПОЛУЧЕННЫХ В ПУЛКОВЕ В 1995-2003 гг НА 26-ДЮЙМОВОМ РЕФРАКТОРЕ.**

Т.П.Киселева.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН.

*На основе анализа рядов наблюдений спутников Сатурна 1995-2003 гг, выполненных в Пулкове на 26-дюймовом рефракторе с помощью фотографии и ПЗС, исследованы и определены систематические ошибки масштаба и ориентировки, возникающие в результате астрометрической редукции относительных наблюдений спутников методом "след-масштаб". Показано, что при фотографических наблюдениях эти ошибки малы, а при ПЗС-наблюдениях - значительны и отрицательно влияют на точность результатов наблюдений. Приводится список результатов всех ПЗС-наблюдений 1995-2003 гг, исправленных за ошибки масштаба и ориентировки.*

*. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (гранты № 04-02-16157 и 04-07-90081).*

## **1. Методика наблюдений.**

Наблюдения спутников больших планет с целью определения их точных координат, пригодных для улучшения теорий движения этих тел до 1995 г производились исключительно фотографическим методом. В 1995 г на рефракторе была установлена ПЗС-матрица ST6, и с этого времени наблюдения производятся двумя методами: фотографическим и с помощью ПЗС. Характеристики ПЗС-матрицы ST6 таковы: линейные размеры 8.6 x 6.5 мм; число пиксел 375 x 242; размеры пиксел 23 x 27 микрон (0.46" x 0.52"); угловое поле матрицы 172" x 125". Были выполнены исследования и калибровка ПЗС матрицы, разработана методика определения центра ПЗС-изображений, методика астрометрической редукции измерений в поле ПЗС-матрицы и учета систематических ошибок, возникающих при ПЗС-наблюдениях вследствие дифференциальной рефракции и неоднородности фона вблизи яркой планеты [1], [2].

Ввиду малого поля 26-дюймового рефрактора с ПЗС-матрицей (всего 3' x 2') одновременно в поле ПЗС удастся наблюдать два или три спутника на расстояниях немногим более 100". Поэтому было решено продолжать фотографические наблюдения, так как они позволяют на одной фотопластинке получать всю систему Сатурна. Преимуществом ПЗС наблюдений по сравнению с фотографическими является большая проникающая сила телескопа, позволяющая наблюдать все 8 главных спутников, включая слабый спутник Гиперион, который невозможно было наблюдать фотографическим методом с достаточной точностью из-за большого различия в яркости Гипериона и остальных спутников. Кроме того, как показали предыдущие исследования, внутренняя точность ПЗС-наблюдений примерно вчетверо выше, чем внутренняя точность фотографических наблюдений относительных координат спутников [2]:

внутренняя точность ПЗС наблюдений:  $\varepsilon_x = \pm 0.015''$ ,  $\varepsilon_y = \pm 0.014''$  ;  
внутренняя точность фотографических наблюдений:  $\varepsilon_x = \pm 0.054''$ ,  $\varepsilon_y = \pm 0.058''$  .

Как ПЗС, так и фотографические наблюдения и их обработка выполняются методом "след-масштаб" без использования опорных звезд, ввиду малого поля 26-дюймового рефрактора [3], [4]. В результате получаются относительные координаты "спутник минус спутник", исправленные в результате астрометрической редукиции за дифференциальную рефракцию. Всего с осени 1994 по осень 2003 г нами получены 670 фотографических положений пар спутников и около 100 ПЗС-положений. Результаты наблюдений представляют собой разности координат в парах спутников, выведенные как средние по пластинке (по 6 изображениям системы спутников) или в серии ПЗС-кадров ( более 10 кадров в каждой серии):  $X_{ij} = \Delta\alpha \cos \delta$ ,  $Y_{ij} = \Delta\delta$  (где  $X = X_i - X_j$ ,  $Y = Y_i - Y_j$ ;  $i, j$  - номера спутников).

## 2. Анализ точности и исследование систематических ошибок наблюдений.

Было произведено сравнение всех наблюдений, как фотографических, так и ПЗС, с эфемеридами JPL, вычисленными на основе новейших теорий движения спутников Сатурна. [5]. Результаты сравнения существенно отличаются от прежних наших сравнений наблюдений с теорией Харпера-Тэйлора, особенно это заметно для 7-го и 8-го спутников, расхождения в (О-С) для которых достигали в некоторых случаях 0.7". На основе сравнения с эфемеридами JPL всех материалов ПЗС и фотографических наблюдений позволило исследовать точность полученных наблюдений и оценить систематические ошибки. Главными систематическими ошибками, возникающими при редукиции измерений методом "след-масштаб", являются ошибки масштаба и ориентировки ПЗС-кадров или фотопластинок относительно экваториальных осей  $\alpha$ ,  $\delta$ . Масштаб вычисляется отдельно на основе специальных исследований и его постоянная величина  $M_0$  используется в формулах астрометрической редукиции. Изменение масштаба вследствие рефракции учитывается при учете дифференциальной рефракции. Ориентировка фотопластинок и ПЗС кадров осуществляется при помощи следов самих спутников (преимущественно Титана), получающихся в начале и в конце серии наблюдений спутников в данную ночь. На фотопластинках следы получаются длиной 800" - 900", на ПЗС-кадрах - не более 172". Соответственно точность определения ориентировки на ПЗС-кадрах в несколько раз хуже, чем на фотографиях. Кроме того, на ПЗС-кадрах измеряется протяженный след, а на фотографиях - два изображения спутника на одной суточной параллели (движение спутника за время производства следа - учитывается) с достаточно большой выдержкой (1-2 минуты), что измеряется гораздо точнее. Ошибки угла ориентировки при фотографических наблюдениях обычно не превышают 0.015°, а при ПЗС-наблюдениях - на порядок хуже. Но при ПЗС-наблюдениях эти ошибки не так заметно влияют на результаты, поскольку сами расстояния между спутниками обычно меньше 100". На таких расстояниях ошибки из-за неточности угла ориентировки могут достигать 0.02" для фотографических наблюдений и 0.1" для ПЗС-наблюдений.

Исследование всего ряда ПЗС и фотографических наблюдений 1995-2003 гг позволило уточнить значение систематических ошибок масштаба и ориентировки для фотографических и ПЗС-наблюдений. Материалом для исследования послужили разности (О-С)<sub>x</sub> и (О-С)<sub>y</sub> в зависимости от расстояний между спутниками по координате X. Представляя эту зависимость линейной функцией, мы определили значения поправок масштаба и ориентировки для обоих видов наблюдений, а также стандартные отклонения (ошибки одного наблюдения). Эти результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Поправки масштаба и ориентировки при ПЗС и фото наблюдениях.

|                                       | ПЗС                | ФОТО                |
|---------------------------------------|--------------------|---------------------|
| Поправка масштаба $\Delta M_0/M_0$    | -0.00137           | -0.00019            |
| Поправка ориентировки $\Delta \gamma$ | -0.00080 (-0.046°) | -0.00008 (-0.0046°) |
| <b>SD</b> (ошибка ед. веса)           | $\pm 0.169''$      | $\pm 0.120''$       |

Малые значения поправок масштаба и ориентировки для фотографических наблюдений свидетельствуют о том, что фотографические наблюдения практически свободны от вышеуказанных систематических ошибок, однако ПЗС наблюдения даже при расстояниях между спутниками в 100" могут быть искажены систематическими ошибками величиной до 0.14". Поэтому имеет смысл наблюдать с помощью ПЗС только тесные пары спутников с расстояниями  $< 50''$ . Анализ точности ПЗС-наблюдений в зависимости от расстояния между спутниками показал существенное уменьшение внешней случайной ошибки при уменьшении расстояний.

При  $X_{ij} = 0'' - 120''$  (все наблюдения),  $SD = 0.169''$ ;  
 $0'' - 100''$   $0.160''$ ;  
 $0'' - 50''$   $0.120''$ .

Таким образом, если наблюдать только тесные пары спутников, с расстояниями не более 50", то точность таких наблюдений будет наиболее высокой, такой же, как при фотографических наблюдениях. Если же измерять расстояния между спутниками на всем поле ПЗС-матрицы ( $X = 120''$ ), то внешняя точность ПЗС-наблюдений будет примерно в полтора раза ниже, чем при фотографических наблюдениях. Таким образом, целесообразность фотографических наблюдений спутников планет на 26-дюймовом рефракторе не вызывает сомнения. ПЗС наблюдения также следует продолжать, но предпочтение следует отдать наблюдениям тесных сближений спутников друг с другом, а также со звездами.

В таблице 2 представлены результаты ПЗС-наблюдений за весь период 1995 - 2003 гг., исправленные за систематические ошибки масштаба и ориентировки. Результаты фотографических наблюдений опубликованы ранее в работах [6], [7]. В таблице 2 приводятся:  $X_{ij} = \Delta \alpha \cos \delta$ ,  $Y_{ij} = \Delta \delta$  (где  $X = X_i - X_j$ ,  $Y = Y_i - Y_j$ ;  $i, j$  - номера спутников в паре) на момент наблюдений по UTC в системе экватора на эпоху даты.  $(O-C)_{X,Y}$  в таблице 2 представляют сравнение результатов наблюдений с эфемеридами JPL.

Таблица 2. Результаты ПЗС-наблюдений спутников Сатурна 1995-2003 гг.

| Дата       | UTC      | $S_i$ | $S_j$ | $X_{ij}$<br>arcsec | $Y_{ij}$ | $(O-C)_X$<br>arcsec | $(O-C)_Y$<br>arcsec |
|------------|----------|-------|-------|--------------------|----------|---------------------|---------------------|
| 1995-08-05 | 23:46:00 | 6     | 5     | -24.413            | 3.560    | -0.046              | 0.038               |
| 1995-08-05 | 23:46:00 | 3     | 5     | -35.949            | 4.411    | 0.190               | 0.192               |
| 1995-08-05 | 23:46:00 | 3     | 6     | -11.536            | 0.851    | 0.236               | 0.154               |
| 1995-08-05 | 23:46:00 | 4     | 3     | -103.321           | 7.687    | -0.393              | 0.285               |
| 1995-08-21 | 00:14:18 | 4     | 6     | -56.547            | 4.425    | 0.202               | -0.044              |
| 1995-08-21 | 00:14:18 | 3     | 6     | -69.415            | 6.495    | 0.264               | 0.021               |
| 1995-08-21 | 00:14:18 | 3     | 4     | -12.868            | 2.070    | 0.062               | 0.065               |
| 1995-08-21 | 00:21:18 | 4     | 6     | -56.808            | 4.815    | -0.289              | 0.355               |
| 1995-08-21 | 00:21:18 | 3     | 6     | -69.715            | 6.734    | -0.362              | 0.288               |
| 1995-08-21 | 00:21:18 | 3     | 4     | -12.908            | 1.920    | -0.074              | -0.076              |
| 1996-08-14 | 23:19:40 | 8     | 5     | 26.316             | -66.749  | 0.191               | 0.145               |

|            |          |   |   |          |         |        |        |
|------------|----------|---|---|----------|---------|--------|--------|
| 1996-08-14 | 23:19:40 | 7 | 5 | 82.313   | -13.634 | 0.087  | 0.049  |
| 1996-08-14 | 23:19:40 | 7 | 8 | 55.997   | 53.115  | -0.105 | -0.096 |
| 1996-08-15 | 00:09:48 | 4 | 6 | 7.100    | 17.270  | -0.047 | 0.019  |
| 1996-08-18 | 23:31:55 | 4 | 6 | -126.273 | 11.859  | -0.256 | 0.305  |
| 1996-08-18 | 22:50:57 | 8 | 6 | 90.023   | -14.178 | 0.089  | -0.045 |
| 1996-08-18 | 23:04:17 | 8 | 6 | 90.073   | -14.208 | 0.022  | -0.130 |
| 1996-08-19 | 23:08:36 | 5 | 6 | -117.811 | 7.816   | -0.036 | 0.228  |
| 1996-08-19 | 23:08:36 | 7 | 6 | -65.149  | 24.618  | -0.238 | 0.111  |
| 1996-08-19 | 23:08:36 | 7 | 5 | 52.672   | 16.802  | -0.192 | -0.117 |
| 1996-08-19 | 23:34:27 | 5 | 6 | -118.542 | 8.005   | -0.083 | 0.306  |
| 1996-08-19 | 23:34:27 | 7 | 6 | -65.950  | 24.537  | -0.133 | 0.141  |
| 1996-08-19 | 23:39:09 | 7 | 5 | 52.592   | 16.642  | -0.014 | -0.130 |
| 1996-08-22 | 00:52:36 | 4 | 6 | -81.361  | -7.755  | -0.063 | -0.254 |
| 1996-08-25 | 01:12:48 | 7 | 6 | -96.442  | 5.843   | -0.021 | -0.233 |
| 1996-09-26 | 21:19:58 | 5 | 6 | 61.023   | -11.951 | 0.033  | -0.161 |
| 1996-10-11 | 21:55:28 | 7 | 6 | -128.376 | -15.303 | 0.188  | -0.137 |
| 1996-10-14 | 20:42:31 | 5 | 6 | 114.567  | -3.248  | 0.082  | 0.027  |
| 1996-10-16 | 21:35:35 | 4 | 6 | 57.078   | 6.786   | -0.007 | 0.070  |
| 1996-10-16 | 23:10:19 | 3 | 5 | -23.032  | 5.192   | -0.099 | 0.024  |
| 1997-09-05 | 00:28:37 | 7 | 6 | 89.302   | 28.331  | 0.032  | -0.059 |
| 1997-09-14 | 23:37:23 | 7 | 6 | -32.895  | 17.974  | -0.116 | -0.114 |
| 1997-09-14 | 23:47:24 | 7 | 6 | -33.015  | 17.974  | -0.102 | -0.139 |
| 1997-09-22 | 22:36:53 | 7 | 6 | -93.348  | -29.475 | -0.227 | 0.343  |
| 1997-09-22 | 22:36:53 | 7 | 4 | 54.525   | -40.086 | -0.161 | -0.187 |
| 1998-09-03 | 00:53:12 | 5 | 6 | 126.864  | 6.081   | 0.122  | -0.385 |
| 1998-11-10 | 20:27:35 | 5 | 6 | -105.104 | 14.516  | -0.090 | -0.104 |
| 1998-11-11 | 20:36:37 | 5 | 6 | -161.060 | 23.961  | -0.318 | -0.361 |
| 1998-11-17 | 20:01:51 | 7 | 6 | -105.825 | -50.125 | 0.173  | -0.037 |
| 1998-11-17 | 20:26:51 | 5 | 6 | 36.840   | -38.440 | 0.143  | 0.119  |
| 1998-11-17 | 20:26:51 | 3 | 6 | 75.894   | -43.609 | 0.171  | 0.125  |
| 1998-11-17 | 20:26:51 | 3 | 5 | 39.043   | -5.160  | 0.017  | 0.015  |
| 1998-11-18 | 18:15:49 | 7 | 6 | -28.669  | -53.093 | 0.398  | 0.273  |
| 1999-08-19 | 01:03:05 | 6 | 7 | -5.978   | -48.475 | 0.104  | -0.052 |
| 1999-11-07 | 22:08:37 | 5 | 7 | 53.213   | -81.627 | 0.164  | 0.076  |
| 1999-11-07 | 21:45:31 | 6 | 4 | -104.082 | -34.733 | 0.200  | 0.030  |
| 1999-11-07 | 21:45:31 | 6 | 3 | -122.147 | -29.808 | 0.214  | 0.021  |
| 1999-11-07 | 21:45:31 | 4 | 3 | -18.065  | 4.926   | 0.015  | 0.008  |
| 1999-11-07 | 21:45:31 | 6 | 2 | -138.820 | -28.261 | 0.252  | 0.013  |
| 1999-11-07 | 21:45:31 | 4 | 2 | -34.738  | 6.472   | 0.053  | -0.017 |
| 1999-11-07 | 21:45:31 | 3 | 2 | -16.663  | 1.547   | 0.048  | -0.008 |
| 1999-11-07 | 21:45:27 | 4 | 1 | -32.434  | 0.424   | 0.235  | 0.120  |
| 1999-11-07 | 21:45:27 | 3 | 1 | -14.360  | -4.491  | 0.232  | 0.139  |
| 2000-01-31 | 17:28:17 | 4 | 3 | -11.896  | -0.900  | 0.045  | -0.003 |
| 2000-01-31 | 17:28:17 | 5 | 4 | 94.599   | -21.124 | 0.109  | 0.034  |
| 2000-01-31 | 17:28:17 | 5 | 3 | 82.703   | -22.024 | 0.144  | 0.031  |
| 2000-02-20 | 17:07:08 | 4 | 2 | -2.400   | -24.410 | 0.116  | 0.081  |
| 2000-02-20 | 17:07:08 | 4 | 3 | -12.207  | -25.060 | 0.153  | 0.022  |
| 2000-02-20 | 17:07:08 | 2 | 3 | -9.794   | -0.638  | 0.051  | -0.047 |
| 2000-02-20 | 17:07:08 | 6 | 7 | -21.880  | -20.077 | 0.222  | 0.003  |
| 2000-10-19 | 00:18:08 | 3 | 4 | -25.491  | -5.388  | 0.097  | -0.082 |
| 2001-01-22 | 19:20:25 | 4 | 5 | 13.970   | 21.624  | -0.058 | -0.107 |
| 2001-01-22 | 19:20:25 | 2 | 5 | -12.838  | 36.501  | -0.012 | -0.122 |
| 2001-01-22 | 19:20:25 | 3 | 5 | -76.246  | 14.419  | 0.223  | 0.067  |
| 2001-01-22 | 19:20:25 | 2 | 4 | -26.809  | 14.877  | 0.045  | -0.015 |
| 2001-01-22 | 19:20:25 | 3 | 4 | -90.216  | -7.205  | 0.280  | 0.175  |
| 2001-01-22 | 19:20:25 | 3 | 2 | -63.408  | -22.082 | 0.234  | 0.189  |
| 2001-03-07 | 18:10:14 | 7 | 6 | 56.036   | 9.869   | -0.191 | -0.197 |
| 2001-03-07 | 18:41:27 | 4 | 3 | 18.559   | 11.413  | -0.017 | -0.052 |
| 2001-09-17 | 01:38:58 | 7 | 6 | 67.484   | 3.653   | -0.240 | 0.012  |
| 2001-12-23 | 20:15:33 | 3 | 5 | -39.070  | 14.879  | 0.046  | -0.122 |
| 2001-12-23 | 20:37:14 | 8 | 6 | -77.521  | 51.143  | -0.048 | -0.392 |

|            |          |   |   |         |         |        |        |
|------------|----------|---|---|---------|---------|--------|--------|
| 2002-01-06 | 19:22:53 | 4 | 3 | -9.263  | 4.778   | -0.019 | -0.106 |
| 2002-03-08 | 16:38:35 | 4 | 3 | -14.173 | -4.069  | -0.002 | -0.123 |
| 2002-03-08 | 16:38:35 | 5 | 3 | -65.658 | 9.070   | 0.087  | -0.279 |
| 2002-03-08 | 16:38:35 | 5 | 4 | -51.484 | 13.139  | 0.080  | -0.156 |
| 2002-03-08 | 17:05:12 | 7 | 8 | 14.977  | -79.990 | 0.124  | 0.147  |
| 2002-03-10 | 16:59:40 | 7 | 8 | -31.876 | -59.673 | -0.141 | -0.142 |
| 2002-03-14 | 18:10:46 | 8 | 6 | -52.907 | 38.222  | 0.200  | 0.088  |
| 2002-03-17 | 17:15:33 | 5 | 6 | 98.236  | 1.550   | -0.284 | -0.100 |
| 2002-03-17 | 17:15:33 | 7 | 6 | 51.021  | -66.000 | -0.019 | 0.003  |
| 2002-03-17 | 17:15:33 | 7 | 5 | -47.213 | -67.546 | 0.268  | 0.104  |
| 2002-03-24 | 17:36:53 | 7 | 6 | 56.833  | -4.527  | -0.118 | 0.180  |
| 2002-12-17 | 00:20:01 | 4 | 5 | 9.241   | -14.761 | -0.057 | 0.029  |
| 2003-03-03 | 17:22:45 | 4 | 5 | -7.765  | -10.742 | 0.078  | 0.002  |
| 2003-05-03 | 18:50:58 | 7 | 4 | 79.022  | 96.190  | -0.370 | -0.325 |
| 2003-03-05 | 19:39:21 | 3 | 5 | 2.683   | 31.376  | -0.116 | -0.145 |
| 2003-03-05 | 19:39:21 | 2 | 5 | 14.178  | 37.361  | -0.163 | -0.118 |
| 2003-03-09 | 18:21:02 | 3 | 4 | 4.507   | -27.512 | 0.132  | 0.152  |
| 2003-03-09 | 18:21:02 | 5 | 4 | -36.125 | -25.275 | 0.239  | 0.000  |
| 2003-03-09 | 18:21:02 | 7 | 4 | -93.774 | 38.678  | 0.033  | -0.436 |
| 2003-03-24 | 18:23:55 | 5 | 6 | -18.635 | 47.377  | -0.210 | -0.311 |
| 2003-03-26 | 18:24:59 | 4 | 3 | -8.460  | -4.225  | 0.014  | 0.188  |

-----  
 Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований гранты № 04-02-16157 и 04-07-90081.

Результаты ПЗС-наблюдений, приведенные в данной работе будут включены в астрометрическую базу данных по фотографическим и ПЗС-наблюдениям тел Солнечной системы, создаваемую в лаборатории астрометрии и звездной астрономии ГАО РАН [8].

### 3. Литература.

1. И.С.Измайлов, А.А.Киселев, Т.П.Киселева, Е.В.Хруцкая. Применение ПЗС-камеры в Пулковских программах наблюдений двойных и кратных звезд и спутников больших планет на 26-дюймовом рефракторе. ПАЖ, 1998, т.24, N 10, с.772-779.
2. Т.П.Киселева, И.С.Измайлов, О.А.Калиниченко. Астрометрия спутников Сатурна на основе фотографических и ПЗС-наблюдений на 26-дюймовом рефракторе Пулковской обсерватории в 1995-2000 г. Известия ГАО в Пулкове, 2002, N 216, с.174.
3. А.А.Киселев. Теоретические основания фотографической астрометрии. // Москва, Наука, 1989, 260 с.
4. А.А.Kiselev. Satellite astrometry with long-focus astrograph.// Galactic and Solar System Optical Astrometry. Proceedings of the Royal Greenwich Observatory and the Institute of Astronomy Workshop. Cambridge, June 21-24, 1993, p. 325-328.
5. Jacobson R. A., 2004."The orbits of the major Saturnian satellites and the gravity field of Saturn from spacecraft and Earthbased observations". Submitted to the *Astronomical Journal*.
6. Т.П.Киселева, О.А.Калиниченко. Результаты фотографических наблюдений спутников Сатурна в Пулкове в 1994-1998 гг. Известия ГАО в Пулкове, 2000, N 214, с.344-355.
7. Т.П.Киселева, О.А.Калиниченко. Результаты фотографических позиционных наблюдений спутников Сатурна на 26-дюймовом рефракторе в Пулкове в 1999-2001гг.//Известия ГАО в Пулкове, 2002, № 216, с.185-190.
8. Е.В.Хруцкая, М.Ю.Ховричев. Каталог Pul-3 SE как часть астрометрической базы данных Пулковской обсерватории. Труды международной астрономической конференции "Основные направления развития астрономии в России", Казань, 2004, стр 101-107.

**The analysis of sistematic errors of scale and orientation in photographic and CCD observations of the Major Saturnian Satellites with the help of 26-inch Refractor at Pulkovo in 1995-2003.**

T.P.Kiseleva

*The investigations and determinations of systematic errors of scale and orientation in CCD and photo observations of Saturnian Satellites maden with 26-inch Refractor at Pulkovo in 1995-2003 were carried out. The method "scale-trale" have been used for the astrometric reduction. As it was shown the errors of scale and orientation are very small for the photographic observations but its considerable for the CCD ones. The list of CCD results 1995-2003 corrected by scale and orientation errors are presented.*

*The works have been carried out with the support of RFBR ( № 04-02-16157 and 04-07-90081).*