

УДК 523.43-323

Переобработка фотографических наблюдений Марса и его спутников, выполненных в ГАО НАНУ в 1963—1988 гг., с использованием каталогов PPM и АСТ

Е. М. Ижакевич, С. В. Шатохина, В. В. Головня, И. В. Ледовская, С. П. Майор

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины
03680, ГСП, Киев-127, Голосиив

Коротко описана методика приведения наблюдений Марса и его спутников к системам каталогов PPM и АСТ. Определены отклонения $O - C$ и проведен их анализ.

PEREOBROBKA FOTOGRAFICHNIH SPOSTEREZENЬ MARSA I ЙОГО СУПУТНИКІВ, ВИКОНАНИХ В ГАО НАНУ В 1963—1988 РР., З ВИКОРИСТАННЯМ КАТАЛОГІВ PPM I АСТ, Іжакевич О. М., Шатохіна С. В., Головня В. В., Ледовська І. В., Майор С. П. — Коротко описується методика приведення спостережень Марса і його супутників на системи каталогів PPM і АСТ. Визначені різниці $O - C$ і зроблено їх аналіз.

REREDUCTION OF THE PHOTOGRAPHIC OBSERVATIONS OF MARS AND ITS SATELLITES CARRIED OUT FROM 1963 TO 1988 AT THE MAIN ASTRONOMICAL OBSERVATORY OF THE ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE USING THE PPM AND ACT CATALOGUES, by Izhakevich E. M., Shatokhina S. V., Golovnya V. V., Ledovskaya I. V., Major S. P. — The procedures used in rereducing the observations to the PPM and ACT catalogues are briefly described. The residuals for these positions are derived and analyzed.

Фотографические наблюдения Марса и его спутников выполнены сотрудниками ГАО НАНУ на двойном длиннофокусном астрографе $D = 40$ см, $F = 5.5$ м (ДДА) в Голосииве, на двойном астрографе Цейса $D = 40$ см, $F = 3$ м (ДАЦ) в Китабской широтной станции им. Улугбека, на 60-см рефлекторах фирмы Карл Цейс (Ц600) на г. Майданак (Узбекистан) и в Боливии. В наблюдениях принимали участие Э. А. Герц, И. М. Деменко, М. Л. Дивинский, Е. М. Ижакевич, И. В. Ледовская, Р. Ф. Лысякова, С. П. Майор, Г. В. Мороз, А. Б. Онегина, Р. Л. Семеренко, Е. М. Середа, Ю. К. Филиппов, С. В. Шатохина. Результаты обработки этих наблюдений, за исключением боливийских, опубликованы [1—12].

В течение указанного периода наблюдений несколько изменялась методика фотографирования Марса и спутников, совершенствовались отдельные этапы обработки наблюдений: измерения, редуцированные вычисления, исправление возможных искажающих эффектов, влияющих на точность

определения координат α и δ . Наиболее существенным недостатком опубликованных положений Марса и спутников является то, что они получены в системах разных по точности опорных каталогов звезд. Сначала использовались Йельские каталоги, затем SAO и AGK3, позднее — FOCAT и каталог слабых звезд (H^*), составленный Х. И. Поттером специально по трассе Марса в оппозицию 1988 г. Естественно, положения Марса и спутников обременены разными ошибками, которые характерны для этих каталогов. В настоящее время упомянутые наблюдения переобработаны с использованием опорных каталогов звезд PPM [14, 17] и АСТ [18]. Предполагалось, что переобработка наблюдений с новейшими опорными каталогами обеспечит не только приведение положений в единую систему, но и улучшит их точность.

Переобработка рядов наблюдений с использованием PPM и АСТ была осуществлена разными способами в зависимости от наличия в нашем распоряжении материалов предшествующих обработок. В связи с отсутствием результатов измерений многих фотопластинок часть наблюдений (1963—1984 гг.) была обработана методом депенденсов. Для наблюдений с сохранившимися прежними измерениями фотопластинок (в т. ч. за 1980, 1982, 1984 гг.) была проведена новая редукция с использованием координат звезд из PPM и АСТ. Для майданакских наблюдений проделана двухступенчатая привязка к опорному каталогу звезд. Опубликованные положения, полученные в системах более ранних каталогов (Йельских, SAO, AGK3, FOCAT и H^*), были исправлены за счет обнаруженных ошибок и неточностей. В результате редукций для разных оппозиций получены средние ошибки единицы веса по опорным звездам, представленные в табл. 1. Эти ошибки получились наименьшими при использовании координат опорных звезд из каталога АСТ.

В итоге получен каталог, состоящий из 942 положений Марса, 283 положений Деймоса и 133 положений Фобоса. Каталог размещен в сети Интернет по адресу:

<http://www.mao.kiev.ua/ast/mphdcat.htm>.

Ранее опубликованные и вновь полученные наблюдаемые положения сравнивались с вычисленными положениями Марса и спутников на основании эфемерид JPL с помощью системы Horizons on-line. При этом положения в системе Йельских каталогов были исправлены поправками Yale—GC, FK3—GC и FK4—FK3 [13, 15, 16]. Полученные для Марса, Деймоса и Фобоса средние значения $O - C$ со своими средними квадратичными ошибками приведены в табл. 2—4. Кроме того, указаны количество положений n , взятое из публикаций, и количество положений k , оставшихся после отбраковки. Отбраковка положений была проведена таким образом. На координатную сетку были нанесены все значения $O - C$, соответствующую

Таблица 1. Средние ошибки единицы веса

| Год | Количество наблюдений | Ранние каталоги | | | PPM каталог | | АСТ каталог | |
|------|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | Название | σ_α | σ_δ | σ_α | σ_δ | σ_α | σ_δ |
| 1980 | 119 | AGK3 | 0.31" | 0.35" | 0.23" | 0.24" | 0.17" | 0.15" |
| 1982 | 11 | SAO | 0.75 | 0.75 | 0.17 | 0.28 | 0.18 | 0.23 |
| 1982 | 43 | AGK3 | 0.33 | 0.38 | 0.26 | 0.24 | 0.24 | 0.21 |
| 1984 | 11 | SAO | 0.37 | 0.80 | 0.33 | 0.43 | 0.35 | 0.42 |
| 1986 | 27 | FOCAT | 0.43 | 0.45 | 0.32 | 0.37 | 0.33 | 0.36 |
| | | SAO | 2.05 | 1.64 | | | | |
| 1986 | 38 | FOCAT | 0.28 | 0.33 | 0.24 | 0.39 | 0.24 | 0.40 |
| 1988 | 102 | H^* | 0.26 | 0.22 | 0.22 | 0.21 | 0.22 | 0.21 |

Таблица 2. Результаты наблюдений Марса (1963—1988 гг.)

| Год | Телескоп | n | k | Ранние каталоги | | Каталог PPM | | Каталог АСТ | | |
|---------------|----------|--------|-----|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | | | | Название | $\overline{(O-C)}_{\alpha}$ | $\overline{(O-C)}_{\delta}$ | $\overline{(O-C)}_{\alpha}$ | $\overline{(O-C)}_{\delta}$ | $\overline{(O-C)}_{\alpha}$ | $\overline{(O-C)}_{\delta}$ |
| 1963 | ДДА | 92 | 90 | Yale | -0.003 ^S | 0.17" | -0.022 ^S | 0.06" | -0.020 ^S | 0.15" |
| | | | | | ±0.025 | ±0.27 | ±0.028 | ±0.27 | ±0.028 | ±0.28 |
| 1967 | ДДА | 103 | 72 | Yale | -0.043 | -0.50 | -0.008 | -0.41 | -0.011 | -0.30 |
| | | | | | 0.047 | 0.57 | 0.031 | 0.34 | 0.032 | 0.34 |
| 1971— 1972 | ДДА | 107 | 92 | SAO | -0.013 | 0.11 | -0.014 | -0.20 | -0.016 | -0.17 |
| | | | | | 0.054 | 0.60 | 0.057 | 0.45 | 0.055 | 0.44 |
| 1973 | ДДА | 65 | 64 | SAO | 0.022 | 0.38 | 0.033 | 0.33 | 0.026 | 0.36 |
| | | | | | 0.027 | 0.36 | 0.034 | 0.51 | 0.034 | 0.47 |
| 1975— 1976 | ДДА | 68 | 66 | SAO | -0.019 | 0.48 | 0.007 | 0.27 | 0.014 | 0.47 |
| | | | | | 0.058 | 0.35 | 0.041 | 0.48 | 0.049 | 0.44 |
| 1977— 1978 | ДДА | 102 | 100 | AGK3 | 0.041 | -0.10 | 0.034 | 0.11 | 0.045 | 0.13 |
| | | | | | 0.037 | 0.43 | 0.034 | 0.36 | 0.030 | 0.34 |
| 1980 | ДДА | 119 | 119 | AGK3 | 0.023 | -0.08 | 0.020 | 0.11 | 0.018 | 0.20 |
| | | | | | 0.037 | 0.26 | 0.033 | 0.23 | 0.032 | 0.27 |
| 1982 | ДДА | 59 | 54 | SAO+AGK3 | 0.005 | -0.02 | 0.010 | 0.04 | 0.009 | 0.27 |
| | | | | | 0.30 | 0.32 | 0.032 | 0.27 | 0.029 | 0.29 |
| | | Из них | 11 | SAO | 0.021 | -0.07 | 0.050 | -0.15 | 0.043 | -0.02 |
| | | | | | 0.024 | 0.46 | 0.016 | 0.23 | 0.016 | 0.23 |
| | | | 43 | AGK3 | 0.001 | -0.01 | 0.000 | 0.08 | 0.001 | 0.34 |
| | | | | | 0.030 | 0.28 | 0.027 | 0.26 | 0.025 | 0.25 |
| 1984 | ДДА | 11 | 11 | SAO | -0.001 | 0.17 | 0.037 | 0.68 | 0.037 | 0.65 |
| | | | | | 0.045 | 0.26 | 0.047 | 0.20 | 0.043 | 0.21 |
| 1986 | ДАЦ | 27 | 27 | FOCAT | 0.030 | -0.23 | 0.029 | -0.16 | 0.022 | -0.10 |
| | | | | | 0.045 | 0.72 | 0.039 | 0.63 | 0.038 | 0.59 |
| | | Те же | 27 | SAO | 0.042 | -0.20 | | | | |
| | | | | | 0.086 | 0.56 | | | | |
| 1986 | Ц600 | 50 | 40 | FOCAT | -0.043 | -0.71 | -0.033 | -0.58 | -0.036 | -0.50 |
| | | | | | 0.061 | 0.58 | 0.052 | 0.52 | 0.051 | 0.52 |
| 1988 | Ц600 | 139 | 121 | H* | -0.045 | -0.08 | -0.037 | -0.26 | -0.045 | -0.14 |
| | | | | | 0.053 | 0.49 | 0.050 | 0.48 | 0.052 | 0.43 |
| Все | | 942 | 856 | | -0.004 | -0.02 | 0.000 | -0.03 | 0.000 | 0.06 |
| | | | | | 0.053 | 0.53 | 0.048 | 0.48 | 0.049 | 0.46 |

Таблица 3. Результаты наблюдений Деймоса (1963—1988 гг.)

| Год | n | k | Ранние каталоги | | Каталог PPM | | Каталог АСТ | | |
|-----------|-----|-----|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | | | Название | $\overline{(O-C)}_{\alpha}$ | $\overline{(O-C)}_{\delta}$ | $\overline{(O-C)}_{\alpha}$ | $\overline{(O-C)}_{\delta}$ | $\overline{(O-C)}_{\alpha}$ | $\overline{(O-C)}_{\delta}$ |
| 1963 | 10 | 9 | Yale | 0.035 ^S | 0.12" | 0.010 ^S | -0.05" | 0.006 ^S | 0.06" |
| | | | | ±0.036 | ±0.58 | ±0.036 | ±0.58 | ±0.037 | ±0.56 |
| 1967 | 18 | 8 | Yale | 0.019 | 0.38 | -0.007 | 0.33 | -0.004 | 0.38 |
| | | | | 0.51 | 0.43 | 0.035 | 0.56 | 0.036 | 0.55 |
| 1973 | 21 | 19 | SAO | 0.020 | 0.61 | -0.005 | 0.61 | -0.011 | 0.60 |
| | | | | 0.031 | 0.54 | 0.031 | 0.58 | 0.030 | 0.59 |
| 1975—1976 | 20 | 15 | SAO | 0.098 | 0.53 | -0.028 | 0.25 | -0.031 | 0.36 |
| | | | | 0.063 | 0.51 | 0.042 | 0.64 | 0.042 | 0.57 |
| 1978 | 30 | 26 | AGK3 | -0.034 | 0.31 | -0.036 | 0.33 | -0.020 | 0.33 |
| | | | | 0.039 | 0.61 | 0.039 | 0.55 | 0.040 | 0.53 |
| 1980 | 60 | 50 | AGK3 | 0.002 | -0.07 | -0.004 | 0.15 | -0.013 | 0.29 |
| | | | | 0.046 | 0.43 | 0.045 | 0.42 | 0.042 | 0.40 |
| 1986 | 30 | 28 | FOCAT | 0.003 | 0.02 | 0.004 | 0.11 | 0.001 | 0.17 |
| | | | | 0.038 | 0.47 | 0.031 | 0.31 | 0.030 | 0.33 |
| 1988 | 94 | 87 | H* | 0.002 | 0.16 | 0.010 | 0.01 | 0.004 | 0.11 |
| | | | | 0.026 | 0.40 | 0.026 | 0.33 | 0.028 | 0.36 |
| Все | 283 | 242 | | -0.009 | 0.18 | -0.002 | 0.16 | -0.006 | 0.24 |
| | | | | 0.046 | 0.50 | 0.037 | 0.46 | 0.036 | 0.45 |

Таблица 4. Результаты наблюдений Фобоса (1986—1988 гг.)

| Год | n | k | Ранние каталоги | | Каталог PPM | | Каталог АСТ | | |
|------|-----|-----|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | | | Название | $\overline{(O-C)}_{\alpha}$ | $\overline{(O-C)}_{\delta}$ | $\overline{(O-C)}_{\alpha}$ | $\overline{(O-C)}_{\delta}$ | $\overline{(O-C)}_{\alpha}$ | $\overline{(O-C)}_{\delta}$ |
| 1986 | 13 | 11 | FOCAT | -0.024^s ± 0.026 | $0.31''$ ± 0.32 | -0.012^s ± 0.018 | $0.14''$ ± 0.27 | -0.013^s ± 0.019 | $0.23''$ ± 0.28 |
| 1988 | 120 | 101 | H* | 0.002 0.031 | 0.07 0.35 | 0.014 0.031 | -0.06 0.31 | 0.007 0.032 | 0.07 0.31 |
| Все | 133 | 112 | | -0.001 0.031 | 0.09 0.36 | 0.011 0.031 | -0.04 0.31 | 0.005 0.032 | 0.08 0.31 |

Таблица 5. Средние значения $O-C$, их средние квадратичные ошибки и значения статистики Стьюдента t

| Объект | Количество наблюдений | $\overline{(O-C)}_{\alpha}$ | $\overline{(O-C)}_{\delta}$ | t_{α} | t_{δ} | $t_{\text{табл}}$ |
|---------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------|--------------|-------------------|
| Марс (ДДА) | 668 | 0.009^s ± 0.043 | $0.13''$ ± 0.43 | 5.41 | 7.81 | 2.58 |
| Марс (Ц600) | 161 | -0.043 0.051 | -0.23 0.48 | 10.70 | 6.08 | 2.60 |
| Марс ДАЦ | 27 | 0.022 0.038 | -0.10 0.59 | 3.00 | 0.88 | 2.78 |
| Деймос ДДА | 127 | -0.015 0.040 | 0.34 0.51 | 4.23 | 7.51 | 2.60 |
| Деймос (Ц600) | 115 | 0.003 0.029 | 0.13 0.35 | 1.11 | 3.98 | 2.62 |
| Фобос (Ц600) | 112 | 0.005 0.032 | 0.08 0.31 | 1.65 | 2.73 | 2.62 |

Примечание. В табл. 2—5 в каждой первой строке приведены средние за период наблюдений значения $O-C$, в каждой второй — соответствующая средняя квадратичная ошибка.

щие каждому объекту наблюдений и месту наблюдений. Соответствующие совокупности полученных точек оказались сдвинутыми друг относительно друга и относительно начала отсчета системы координат. Были отброшены все значения $O-C$, которые выходят за пределы интервала $(O-C) \pm N\sigma$, где $(O-C)$ и σ — среднее значение и средняя квадратичная ошибка для соответствующего ряда наблюдений, а N выбраны от 1 до 2.

В табл. 5 для каждого из объектов и телескопов, которые использовались для наблюдений, приведены средние значения $O-C$ в системе каталога АСТ, их средние квадратичные ошибки, значения статистики t и $t_{\text{табл}}$ для уровня значимости 1 %. Значимо отличаются от нуля средние значения $O-C$ положений Марса и Деймоса, полученных по наблюдениям в Голосиве и на Майданаке. Для наблюдений Фобоса на Майданаке и Марса в Китабе таких различий не наблюдается.

Указанные выше систематические различия можно объяснить разными причинами. По нашему мнению, больше всего подвержены систематическим ошибкам наблюдения Марса, выполненные на Майданаке. Целью этих наблюдений было получение точечного изображения спутников Деймоса и Фобоса. Изображения же Марса были искажены дифракционной картинкой от растяжек вторичного зеркала телескопа и, к тому же, смазаны вследствие движения Марса за время экспозиции. Систематические различия для наблюдений Марса и Деймоса в Голосиве, вероятно, возникают вследствие неучета уравнения яркости. К такому же заключению можно прийти, если

рассматривать одномоментные наблюдения Деймоса и Марса в Голосиве. Всего их 159. Распределения их $O - C$ сильно сдвинуты друг относительно друга, в основном по прямому восхождению. В данном случае условия наблюдений для Марса и Деймоса в пределах одной фотопластинки одинаковы, но звездные величины Марса и Деймоса значительно отличаются от звездных величин опорных звезд ($8-9^m$). Неучет этого факта при обработке измерений фотопластинки, видимо, приводит к ошибке уравнения яркости.

Кроме того, имеет место линейная зависимость $O - C$ от склонения для наблюдений Марса в Голосиве. Она выражается такими формулами по α и по δ :

$$(O - C)_\alpha = 0.0003\delta + 0.0065^s,$$

$$(O - C)_\delta = 0.009\delta + 0.039'',$$

где δ — в градусах.

Были проанализированы по отдельности результаты, полученные разными способами фотографирования Марса: с фильтрами, с диафрагмами, с другими ослабителями. Различий между ними не обнаружено.

Сравнение $O - C$, полученных в системах разных каталогов (табл. 2—4), свидетельствует о том, что положения в системе PPM и АСТ близки между собой, но существенно отличаются от опубликованных ранее. По критерию Фишера различия между дисперсиями $O - C$ наблюдаются при сравнении положений в системе PPM или АСТ с положениями в Yale, SAO, AGK3, FOCAT и практически их нет при сравнении с положениями в системе каталога H*.

В заключение отметим, что в результате переобработки всех ранее выполненных наблюдений в ГАО НАНУ получен каталог точных положений Марса, Фобоса и Деймоса в двух системах отсчета FK5/J2000.0 и ICRS/J2000.0, реализуемых опорными каталогами звезд PPM и АСТ. При этом достигнуто улучшение точности за счет привлечения уточненных координат и собственных движений опорных звезд из PPM и АСТ.

1. *Ижакевич Е. М., Калтыгина С. В., Ледовская И. В. и др.* Позиционные фотографические наблюдения Марса и его спутников в 1988 году. — Киев, 1990.—25 с.—(Рукопись деп. в ВИНТИ; № 3888-B90).
2. *Майор С. П., Серeda Е. М.* Позиционные фотографические наблюдения Марса и Деймоса в ГАО АН УССР в 1977—1978 гг. — Киев, 1983.—29 с.—(Рукопись деп. в ВИНТИ; № 6759-83 Деп).
3. *Майор С. П., Серeda Е. М., Шатохина С. В.* Позиционные фотографические наблюдения Марса, Фобоса и Деймоса в 1986 году. — Киев, 1988.—14 с.—(Рукопись деп. в ВИНТИ; № 8734-B88).
4. *Мешкова Р. Ф.* Позиционные наблюдения Марса с применением метода местной десенсибилизации фотопластинки // Астрометрия и астрофизика.—1969.—Вып. 2.—С. 46—52.
5. *Онегина А. Б., Серeda Е. М.* Определение положений Марса и Деймоса на ГАО АН УССР // Тр. 16-й астрометрической конф. СССР. — М., 1965.—С. 75—79.
6. *Онегина А. Б., Серeda Е. М.* Фотографические наблюдения Деймоса в ГАО АН УССР в 1967 г. // Бюл. Ин-та теорет. астрономии.—1971.—12, № 8.—С. 732—738.
7. *Серeda Е. М.* Фотографические наблюдения Марса в ГАО АН УССР в 1963—1967 гг. // Астрометрия и астрофизика.—1972.—Вып. 15.—С. 76—91.
8. *Серeda Е. М.* Фотографические позиционные наблюдения Марса и Деймоса в ГАО АН УССР в 1975—1976 годах. — Киев, 1981.—11 с.—(Рукопись деп. в ВИНТИ; № 3868-81 Деп).
9. *Серeda Е. М.* Позиционные фотографические наблюдения Марса и Деймоса в ГАО АН УССР в 1980 году. — Киев, 1986.—17 с.—(Рукопись деп. в ВИНТИ; № 3583-B86).
10. *Серeda Е. М.* Позиционные фотографические наблюдения Марса в ГАО АН УССР в 1982, 1984 годах. — Киев, 1989.—16 с.—(Рукопись деп. в ВИНТИ; № 632-B89).
11. *Серeda Е. М., Ижакевич Е. М.* Фотографические позиционные наблюдения Марса на 400-мм астрографе ГАО АН УССР в 1971—1972 гг. // Астрометрия и астрофизика.—1978.—Вып. 35.—С. 31—44.

12. *Середа Е. М., Ижакевич Е. М.* Фотографические позиционные наблюдения Марса и Деймоса на 40-см астрографе ГАО АН УССР в 1973 г. // *Астрометрия и астрофизика.*— 1978.—Вып. 36.— С. 72—81.
13. *Barney I.* Supplementary volume to the Yale Zone Catalogues, -30 to 30°. — *Trans. Astron. Obs. Yale Univ.*, 1951.—23 p.
14. *Bastian U., Roeser S.* PPM star catalogue: positions and proper motions of 197179 stars south of -2.5 degrees declination for equinox and epoch J2000.0 — Heidelberg-Berlin-New York: Spektrum Akademischer Verlag GmbH, 1993.—Vol. 3—4.
15. *Fricke W., Kopff A. in collaboration with Gliese W. et al.* Fourth Fundamental Catalogue (FK4). — Heidelberg: Veröff. Astron. Rechen-Inst., 1963.—N 10.
16. *Kopff A.* Vergleich des FK3 mit dem General Catalogue von B. Boss // *Astron. Nachr.*—1939.— 269.—P. 160—167.
17. *Roeser S., Bastian U.* PPM star catalogue: positions and proper motions of 181731 stars north of -2.5 degrees declination for equinox and epoch J2000.0. — Heidelberg-Berlin-New York: Spektrum Akademischer Verlag GmbH, 1991.—Vol. 1—2.
18. *Urban S. E., Corbin T. E., Wysoff G. L.* The ACT Reference Catalog // *Astron. J.*—1998.— 115.—P. 2161—2166.

Поступила в редакцию 06.11.00