

## ЕДИНАЯ РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ТЕОРИЯ ДВИЖЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ПЛАНЕТ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

*М. Д. Кислик, Ю. Ф. Колюка, академик В. А. Котельников, Г. М. Петров,  
В. Ф. Тихонов*

Доклады Академии наук СССР. 1980. Том 255, № 3

В феврале-апреле 1980 г. в Советском Союзе были продолжены радиолокационные наблюдения Меркурия, Венеры и Марса. Среднеквадратичная ошибка измерения времени запаздывания отраженного от поверхности планеты сигнала при этих наблюдениях составила 3–8 мкс. Наблюдения охватили значительные участки орбит планет (139° дуги орбиты в районе нижнего соединения для Меркурия, 82° в районе элонгации для Венеры и 29° в районе противостояния для Марса). Полученная измерительная информация существенно дополнила результаты прежних радиолокационных наблюдений планет, в особенности Меркурия и Марса, для которых последние опубликованные наблюдения относятся соответственно к 1965 и 1971 гг. Тем самым была создана реальная основа для построения единой теории движения внутренних планет солнечной системы, т. е. для одновременного определения элементов орбит Меркурия, Венеры, Земли и Марса по всей совокупности имеющихся наблюдений. В этих целях Институтом радиотехники и электроники АН СССР совместно с рядом организаций была разработана и программно реализована в ЭВМ методика построения такой теории. Основные особенности этой методики по сравнению с примененной в [1, 2] сводятся к следующему.

Для описания гелиоцентрического движения внутренних планет использовались релятивистские дифференциальные уравнения, содержащие в правых частях наряду с ньютоновыми также шварцшильдовские члены, обусловленные влиянием Солнца ([3], стр. 271). В уравнения движения внешних планет шварцшильдовские члены не включались ввиду их малости и сравнительно небольшого интервала интегрирования (20 лет). Для повышения точности расчета движения барицентра системы Земля–Луна интегрирование уравнений движения больших планет и Луны производилось совместно. В число больших планет, движение которых описывается системой дифференциальных уравнений задачи  $n$  тел, дополнительно был введен Нептун. При переводе аст-

рономической единицы  $A$  из световых секунд в километры было принято новое, уточненное значение скорости света  $c = 299\,792,4562$  км/с. Было принято также новое значение массы Меркурия, обеспечивающее, как показали предварительные расчеты, лучшее совпадение фактических и вычисленных значений измеряемых параметров. Фигура Марса аппроксимировалась двухосным эллипсоидом с полярным сжатием  $1/125$ , Меркурия и Венеры — сферами. В качестве независимого переменного использовалось координатное время  $t_k$ , связанное с собственным временем земного наблюдателя  $t$  (атомным временем) соотношением

$$t_k = t \left( 1 + \frac{3}{2} \frac{\mu}{A} \right), \quad (1)$$

где  $\mu = fm_{\odot}/c^2 = 1,477$  км — гравитационный радиус Солнца<sup>1)</sup> ( $f$  — гравитационная постоянная,  $m_{\odot}$  — масса Солнца). Оценка ошибки в расчетной локационной дальности, возникающей вследствие пренебрежения в (1) периодическим членом, обусловленным эллиптичностью земной орбиты, показала, что эта ошибка не превышает 50 м. В начальную эпоху  $t_0 = \text{JD } 2\,437\,000,5 = 7 \text{ III } 1960$ ,  $O^h\text{ET}$  значения  $t_k$  и  $t$  были приняты совпадающими.

Таблица 1

| Планета    | $m$       | Планета | $m$      |
|------------|-----------|---------|----------|
| Меркурий   | 6 023 600 | Юпитер  | 1047,355 |
| Венера     | 408 522,7 | Сатурн  | 3501,6   |
| Земля–Луна | 328 900,1 | Уран    | 22 869   |
| Марс       | 3 098 720 | Нептун  | 19 314   |

Примечание,  $m$  — отношение массы Солнца к массе планеты. Отношение массы Земли к массе Луны 81,301.

При обработке наблюдений в расчетные значения времени запаздывания отраженного сигнала вводились поправки, учитывающие релятивистский радиолокационный эффект [3]. Эти поправки, как и шварцшильдовские члены в правых частях дифференциальных уравнений движения внутренних планет, вычислялись в стандартной системе координат. Релятивистские поправки в оптические (угловые) измерения не вносились, так как их максимальная величина не превышала для рассматриваемой совокупности измерений  $0'',06$ , что почти на два порядка меньше ошибок оптических измерений.

Разработанная методика была применена для построения единой релятивистской теории движения внутренних планет. Исходная измерительная информация включала в себя, кроме радиолокационных

<sup>1)</sup> По другой терминологии  $\mu$  — половина гравитационного радиуса Солнца.

Таблица 2

| Элементы орбиты                         | Меркурий            | Венера              |
|---|---------------------|---------------------|
| Большая полуось а.е.                    | 0,3370983633        | 0,7233301211        |
| Эксцентриситет $e$                      | 0,2056312560        | 0,0067739241        |
| Аргумент перигелия $\omega$ , рад       | 1,1699210371        | 2,1621956187        |
| Наклонение $i$ , рад                    | 0,4990326326        | 0,4268714214        |
| Долгота восходящего угла $\Omega$ , рад | 0,1900688163        | 0,1393904426        |
| Время прохождения перигелия $\tau$      | JD 2436987,34440511 | JD 2436908,09402323 |
| Элементы орбиты                         | Земля–Луна          | Марс                |
| Большая полуось а.е.                    | 0,9999904567        | 1,5237219705        |
| Эксцентриситет $e$                      | 0,0167483794        | 0,0932936483        |
| Аргумент перигелия $\omega$ , рад       | 1,7830424234        | 5,7985896472        |
| Наклонение $i$ , рад                    | 0,4091816208        | 0,4309130058        |
| Долгота восходящего угла $\Omega$ , рад | 6,2831832723        | 0,0585769555        |
| Время прохождения перигелия $\tau$      | JD 2436937,03239746 | JD 2436394,05690967 |

Примечания. 1. Эпоха  $t_0 = \text{JD} 2437000,5 = 7 \text{ III } 1960, \text{O}^h\text{ET}$ . Система координат — геоэквиаториальная эпохи 1960.0. 2. Астрономическая единица  $A = 149\,597\,867,3 \pm 0,3 \text{ км}$  ( $499,0047756 \pm 1 \cdot 10^{-6}$  световых секунд). Радиус Меркурия  $R_{\text{мерк}} = 2434,9 \pm 1,1 \text{ км}$ . Радиус Венеры  $R_{\text{вен}} = 6050,1 \pm 0,1 \text{ км}$ . Экваториальный радиус Марса  $R_{\text{марс}}^3 = 3394,6 \pm 0,3 \text{ км}$ . 3. Приведенные среднеквадратические ошибки констант являются формальными, полученными во внутренней сходимости при обработке измерений.

Таблица 3

| Меркурий                |                          | Венера                  |                          | Марс                    |                          |
|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|
| время наблюдений (годы) | $\sigma_{\text{д}}$ , км | время наблюдений (годы) | $\sigma_{\text{д}}$ , км | время наблюдений (годы) | $\sigma_{\text{д}}$ , км |
| 1964–1965               | 9                        | 1962–1969               | 4,5                      | 1964–1965               | 5                        |
| 1980                    | 2                        | 1970–1980               | 0,9                      | 1967–1980               | 2,5                      |

и оптических наблюдений Венеры и Марса и оптических наблюдений Солнца, использованных в [1, 2], радиолокационные наблюдения Венеры, выполненные в СССР в 1978 г. [4], радиолокационные наблюдения Меркурия, проведенные Аресибской ионосферной обсерваторией (Пуэрто-Рико) в 1964–1965 гг. [5], оптические наблюдения Меркурия, выполненные Николаевской обсерваторией АН СССР, Морской обсерваторией США и Гринвичской астрономической обсерваторией

в 1960–1976 гг., а также упомянутые выше радиолокационные наблюдения Меркурия, Венеры и Марса в 1980 г. Всего было обработано 3768 радиолокационных измерений времени запаздывания отраженного сигнала и 7193 оптических (угловых) измерения. Расчеты выполнены при значениях масс планет и Луны, приведенных в табл. 1. Определяемыми параметрами были значения оскулирующих элементов гелиоцентрических орбит Меркурия, Венеры, барицентра системы Земля–Луна и Марса в начальную эпоху  $t_0$ , астрономическая единица  $A$ , радиус Меркурия  $R_{\text{Мер}}$ , радиус Венеры  $R_{\text{Вен}}$  и экваториальный радиус Марса  $R_{\text{Марс}}^{\text{э}}$  (всего 28 неизвестных). Для описания движения внешних планет и Луны на интервале интегрирования использовались начальные условия, вычисленные по данным [6]. Полученные результаты представлены в табл. 2.

Детальный анализ характера и величины отклонений измеренных дальностей и углов от их расчетных значений, соответствующих построенной теории, привел к следующим результатам. На мерном интервале протяженностью в 20 лет (1960–1980 гг.) отклонения как радиолокационных, так и оптических измерений распределены по закону, близкому к нормальному, с математическим ожиданием, практически равным нулю. Среднеквадратические отклонения измерений дальности  $\sigma_d$  изменяются от 0,9 до 9 км в зависимости от времени проведения наблюдений и лоцируемой планеты (см. табл. 3). Эта зависимость отражает, с одной стороны, повышение точности радиолокационных измерений с течением времени, с другой — характер рельефа лоцируемой планеты. Среднеквадратические отклонения оптических измерений на мерном интервале практически не изменяются и составляют  $0'',6-1'',2$ .

С целью оценки возможностей ньютоновой механики при построении единой теории движения внутренних планет на интервале в 20 лет была дополнительно проведена обработка всей измерительной информации при гравитационном радиусе Солнца  $\mu$ , равном нулю. Как и ожидалось, согласование измеренных и расчетных дальностей заметно ухудшилось. На отдельных участках мерного интервала появились систематические отклонения, достигающие 390 км для Меркурия, 8 км для Венеры и 12 км для Марса. Таким образом, ньютонову механику нецелесообразно применять при решении рассматриваемой задачи. Это, однако, не исключает возможности ее применения при построении на ограниченных временных интервалах частных теорий движения Венеры, Земли и Марса (как это было, например, показано в [1, 2]).

В заключение отметим, что достигнутое при построении единой релятивистской теории движения внутренних планет хорошее согласование опытных и расчетных данных может рассматриваться как экспериментальная проверка общей теории относительности астрономическими методами.

Авторы выражают благодарность участникам работ по радиолокации Меркурия, Венеры и Марса.

Институт радиотехники и электроники  
Академии наук СССР, Москва

Поступило 20 VIII 1980

### **Литература**

1. М. Д. Кислик, Ю. Ф. Колюка и др., ДАН, т. 241, № 5, 1046 (1978).
2. М. Д. Кислик, Ю. Ф. Колюка и др., ДАН, т. 249, № 1, 78 (1979).
3. В. А. Брумберг, Релятивистская небесная механика, М., «Наука», 1972.
4. В. А. Котельников и др., Астрон. журн., т. 57, в. 1, 3 (1980).
5. G. N. Pettengill, R. В. Dyce, D. В. Campbell, Astron. J., v. 72, № 3, 330 (1967).
6. Астрономический ежегодник СССР с приложением 1960–1980 гг.