

## АСТРОНОМИЯ

Н. П. ГРУШИНСКИЙ, Н. Б. САЖИНА

### К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ АБСОЛЮТНОГО ЗНАЧЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Вопрос точного определения абсолютного значения ускорения силы тяжести давно привлекает внимание физиков. Гравитационная постоянная является фундаментальной постоянной физики и основой для многих других измерений. Так, например, точное знание ее необходимо при определении массы Земли в абсолютных единицах. Точность определения величины ампера, а следовательно, и всех производных электрических и магнитных постоянных (ватт, джоуль, эрстед и др.) также зависит от знания абсолютного значения силы тяжести в точке измерения. Ампер устанавливается как единица силы взаимодействия между двумя проводниками определенной конфигурации при прохождении по ним тока. Сила взаимодействия уравнивается при этом весом  $mg$  известной массы  $m$ . Знание абсолютного значения силы тяжести необходимо для отнесения всех гравиметрических съемок мира к единой и правильной системе и получения правильных выводов формулы нормального значения силы тяжести и фигуры Земли.

До последнего времени существует разнбой в гравитационных системах и съемки различных стран, базирующиеся на различные исходные пункты, несовместимы между собой. Существует три абсолютных значения силы тяжести, которые положены в основу всей мировой гравиметрической съемки. Большинство гравиметрических съемок мира отнесено к абсолютному значению силы тяжести, полученному в 1906 г. Кюненом и Фуртвенглером [1] наблюдением над обратными маятниками в Потсдамском геодезическом институте в северо-восточном углу маятникового зала в цокольном этаже:

$$\varphi = 52^{\circ}22',86 \text{ N}, \lambda = 13^{\circ}04',06 \text{ E}, h = 86,24 \text{ м}, g = 981274 \pm 3 \text{ мгал.}$$

Это значение силы тяжести было положено в основу мировой гравиметрической системы, то есть все гравиметрические определения на Земле были отнесены к этому абсолютному значению. В 1936 г. Хейлем и Куком [2] закончено абсолютное определение силы тяжести методом обратных маятников в Вашингтоне, претендующее на более высокую точность. С тех пор американские гравиметрические опреде-

ления часто относят к новой Вашингтонской системе. Значение силы тяжести для Вашингтона в точке с координатами:

$$\varphi = 38^{\circ}56'30'', \quad 143 \text{ N}, \quad \lambda = 77^{\circ}03'56'' \quad 893 \text{ W}, \quad h = 94,75 \text{ м},$$

$$g = 980081,6 \pm 1,2 \text{ мгал.}$$

В 1938 г. Кларком произведено новое определение абсолютного значения силы тяжести методом оборотных маятников в Теддингтоне (Англия):  $\varphi = 51^{\circ}25'14'' \text{ N}, \lambda = 0^{\circ}20'21'' \text{ W}, h = 9,68 \text{ м},$

$$g = 981181,5 \pm 1,5 \text{ мгал.}$$

В 1948 г. в значение силы тяжести для Вашингтона, полученное Кларком, введена Джеффрисом поправка за изгиб и растяжение стержня. После этого получено новое значение силы тяжести:

$$g = 981183,2 \pm 0,6 \text{ мгал.}$$

Эти три определения значительно расходятся; расхождение составляет 4 мгал между двумя последними и 15 мгал между новыми определениями и Потсдамской системой.

Определения силы тяжести в Потсдаме были подвергнуты критике разными авторами [4, 12]. Указывалось, что при определении силы тяжести в Потсдаме не было учтено значительное влияние кривизны ножей и их притачивание. В результате этого критического пересмотра и введения поправок за неучтенные систематические ошибки получены значения силы тяжести для Потсдама, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

| Автор  | Год  | Значение силы тяжести $g$ | Поправка к первоначальному значению $g$ |
|--|------|---------------------------|---|
| Дрейден . . . . .                            | 1942 | 981262,3                  | -11,7                                   |
| Джеффрис . . . . .                           | 1948 | 981263,3                  | -10,7                                   |
| Беррот . . . . .                             | 1949 | 981265,0                  | -9,0                                    |
|  |      | 981262,3                  | -11,7                                   |
| Раздымаха . . . . .                          | 1948 | 981270,0                  | -4                                      |
| Среднее значение по приведенным данным . . . |      | 981264,6                  | -9,4                                    |

В табл. 2 приведены значения силы тяжести в Потсдаме, Вашингтоне и Теддингтоне, наблюдаемые и приведенные к Потсдаму, и разница с принятым для Потсдама первоначальным значением 981274 без учета систематических поправок за кривизну ножей и др.

Эта таблица иллюстрирует давно уже известный факт неточности Потсдамской системы, завышающей значения силы тяжести на полтора десятка миллигал. Однако и более точные определения силы тяжести в Вашингтоне и Теддингтоне расходятся на 5 миллигал, а значит, претендуя на равную точность, далеко не уверенно представляют истинное значение силы тяжести.

Таблица 2

| Пункт определения | Значения силы тяжести, $g_{\text{набл.}}$ | Значения силы тяжести, приведенные к Потсдаму, $g_{\text{прив.}}$ | Разница с первоначальным значением без учета систематических поправок $\delta g$ |
|-------------------|---|---|--|
| Потсдам . . . .   | 981264,6                                  | —   | — 9,4  |
| Вашингтон . . .   | 980081,6                                  | 981256,5  | —17,5  |
| Теддингтон . . .  | 981183,2                                  | 981261,5  | —12,5  |

Все рассмотренные выше определения произведены в принципе методом наблюдения колебаний оборотного маятника. В последнее время указывалось на принципиальную ограниченность точности этого метода при современном состоянии техники [5]. Основными источниками ошибок этого метода являются: удлинение маятника под действием собственного веса, стачивание ножей, изгибы стержня и деформации ножевых опор, неточность измерения длины. Эти источники ошибок ограничивают точность результата в лучшем случае несколькими миллиграммами. Их невозможно ни учесть достаточно точно, ни устранить. Этот метод утратил свое преимущество над методом получения  $g$  из наблюдения свободного падения (состоявшее в периодичности и изохронности колебаний) с того момента, как техника измерения малых промежутков времени достигла точности восьмого знака. Метод свободного падения имеет свои источники погрешностей, однако принципиально иные, чем при маятниковых определениях, и оба метода дают независимые результаты, поэтому второй метод может служить для контроля первого. В настоящее время абсолютные определения силы тяжести методом свободного падения производятся в нескольких местах.

В СССР такие работы ведутся в Научно-исследовательском институте метрологии П. А. Агалецким, К. Н. Егоровым [6] и А. И. Марциняком [7]. Ими произведены измерения двумя разновидностями способа свободного падения: методом совмещения свободного и несвободного падения (I) и методом падения жезла в вакууме (II), а также с помощью наблюдения трехоборотных кварцевых маятников. Получены значения силы тяжести, приведенные в табл. 3.

Таблица 3

| Метод                         | Время определения                 | $g_{\text{набл.}}$ | $\epsilon$ |
|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------|------------|
| Оборотного маятника . . . .   | август 1955 г.                    | 981919,0           | $\pm 0,4$  |
| Свободного падения I . . . .  | ноябрь 1954 г.<br>октябрь 1955 г. | 981921,5           | $\pm 1,6$  |
| Свободного падения II . . . . | 1955—1956 гг.                     | 981923             | $\pm 2,0$  |

Было принято среднее весовое значение силы тяжести для пункта ВНИИМ с координатами:

$\varphi = 59^{\circ}55'06''N$ ,  $\lambda = 30^{\circ}19'35''E$ ,  $h = 3,5$  м,  $g = 981919,3 \pm 0,6$  мгал.

Вряд ли можно согласиться с выбором весов при образовании сред-

него, которые приняты обратно пропорциональными квадратам средних квадратических ошибок определений. Нам кажется, что малая средняя квадратическая ошибка результата, полученного при определении  $g$  обратными маятниками, носит формальный характер. Во всяком случае она может характеризовать лишь внутреннюю сходимость и не выявляет систематических ошибок, присущих методу. Мы не можем не согласиться с Хаубричем, Розе и Вуллардом [5] в том, что метод обратных маятников, если его принципиально не улучшить, на современном уровне развития техники не в состоянии дать точность выше 1 мгала. Мы полагаем также, что нет никаких оснований по существу исключать при выводе среднего значения  $g$  результаты двух опытов наблюдения свободного падения. Имея в виду, что ошибки метода, по-видимому, превосходят ошибки внутреннего разброса, за окончательные значения силы тяжести, по определениям во ВНИИМ, следует принять простое среднее из всех трех методов. Тогда значение  $g$  для ВНИИМ будет

$$g = 981921,2 \text{ мгал.}$$

или, будучи приведено к Потсдаму,

$$g = 981264,5 \text{ мгал.}$$

С 1946 г. работы по определению абсолютного значения силы тяжести методом свободного падения ведутся в Париже Воле [8]. Здесь в последнее время разработан способ, существенно повысивший точность эксперимента [9].

За время с декабря 1957 по май 1958 г. Тулином были произведены измерения методом киносъемки падающего метрового жезла из иридиевой платины. При этом устранены источники систематических ошибок, имевшие место в опытах Воле. Автором подсчитано, что наблюдения Воле имели систематическую ошибку порядка  $\pm 10$  мгал за неучет сопротивления остаточного воздуха. После того как было произведено разряжение до  $5 \cdot 10^{-5}$  мм Hg, возможная ошибка за сопротивление воздуха оказалась не превосходящей 0,1 мгал. При постановке эксперимента важна стабилизация частот и длительности вспышек, при которых ведется фотографирование. Эти вспышки осуществлялись длительностью в 0,2 мсек с чистотой в 100 и 125 гц. Дисперсия максимальной яркости вспышек во времени всегда  $< 1 \cdot 10^{-7}$  сек. Частота вспышек сравнивалась с эталонной частотой в 200 кгц. Стабильность опоры во время эксперимента контролировалась сейсмографом.

Результат получен из 20 падений, в каждом из которых обрабатывалось от 43 до 55 изображений штрихов. Среднее квадратическое отклонение одного падения от середины составляет  $\pm 1$  мгал. Отсюда формальная точность среднего результата значительно выше 1 мгал. Однако из осторожности, имея в виду возможное наличие неучтенных

Таблица 4

| $\varphi$ | $\lambda$  | $h$     | $g_{\text{набл.}}$ | $\Delta g$ от Потсдама | $g$ приведенное к Потсдаму | Отклонение от Потсдама |
|-----------|------------|---------|--------------------|------------------------|----------------------------|------------------------|
| 48°49'45" | 2°13'14" В | 65,93 м | 980927,7           | +333,6                 | 981261,3                   | -12,7                  |

систематических ошибок, автор оценивает результат как имеющий точность в  $\pm 1$  мгал или несколько выше. В табл. 4 приводим результат, полученный Тулином.

Этот результат, по-видимому, можно считать одним из лучших современных определений абсолютного значения силы тяжести. В табл. 5 приведены все наиболее известные фундаментальные определения абсолютных значений силы тяжести.

Таблица 5

| Автор                | Год       | Место         | Способ определения          | $g_{\text{набл.}}$ | $g$ приведенное к Потсдаму | Отклонение от Потсдама |
|----------------------|-----------|---------------|-----------------------------|--------------------|----------------------------|------------------------|
| Бессель              | 1826      | Кенигсберг    | 2 нитяных маятника          |                    | 981246                     | -28                    |
| Лоренцони            | 1828      | Падуа         | 2 оборотных маятника        |                    | 981263                     | -11                    |
| Бараккер             | 1889      | Мадрид        | 4 оборотных маятника        | 979277             | 981270                     | -4                     |
| Пизатти и Пуччи      | 1894      | Рим           | 2 нитяных маятника          | 980343             | 981270                     | -4                     |
| Дефорж               | 1894      | Париж         | 4 оборотных маятника        |                    | 981282                     | +8                     |
| Оппольцер            | 1904      | Вена          | 2 оборотных маятника        | 980862             | 981283                     | +9                     |
| Кюнен и Фуртвенглер  | 1906      | Потсдам       | 5 оборотных маятников       | 981264,6           | 981274                     | -9,4                   |
| Иванов               | 1911      | Петербург     | нитяной маятник             | 981948             | 981291                     | +17                    |
| Басков               | 1936      | Ленинград     | нитяной маятник             | 981929             | 981272                     | -2                     |
| Хейль и Кук          | 1936      | Вашингтон     | 3 оборотных маятника        | 980081,6           | 981256,5                   | -17,5                  |
| Кларк                | 1938      | Теддингтон    | 1 оборотный маятник         | 981183,2           | 981261,5                   | -12,5                  |
| Агалецкий и Егоров   | 1956      | Ленинград     | 3 оборотных маятника        | 981919             | 981262,2                   | -11,8                  |
| Марциняк и Агалецкий | 1955—1956 | Ленинград     | падение жезла,              | 981922,2           | 981265,4                   | -8,6                   |
| Баглиетто            | 1956      | Буэнос-Айрес* | 2 способа оборотный маятник | 979696             | 981265                     | -9                     |
| Тулин                | 1958      | Париж         | падение жезла               | 980927,7           | 981261,3                   | -12,7                  |

\* Данные, полученные в Буэнос-Айресе, являются предварительными.

Из таблицы видно, что все результаты определения абсолютного значения силы тяжести, полученные за последние 40 лет, будучи достаточно надежно редуцированы к Потсдаму, меньше результатов, полученных Кюненом и Фуртвенглером, на 9—17 мгал.

Из выполненных за последние годы измерений  $g$  наиболее надежным, по-видимому, является определение Тулина (1958 г.), совпадающее по результатам с полученным Кларком в Теддингтоне и почти совпадающее с полученным Агалецким в Ленинграде. От значений, полученных Кюненом и Фуртвенглером, оно отличается на 12,7 мгал. Среднее значение отклонения от Потсдамской системы по всем изве-



ственным абсолютным определениям силы тяжести последнего времени, начиная с Вашингтонского определения, то есть по наиболее точным работам, составляет  $-12,4$  мгал  $\pm 1,6$ . При этом для Ленинграда принимается значение, полученное как простое среднее из трех определений (981921,2). Значение силы тяжести в Потсдаме, по новейшим абсолютным определениям, оказывается равным 981261,6 мгал.

Таким образом, назрела необходимость отказаться от Потсдамской гравитационной системы и перейти на новую систему со значением силы тяжести, отличным от прежнего на 13 мгал. История уже знает подобный прецедент. После абсолютных определений в Потсдаме был осуществлен переход от старой, Венской, системы к новой, Потсдамской. Отличие между значениями силы тяжести в этих системах составляло 16 мгал. При некоторых работах следует уже сейчас учитывать отличие Потсдамской системы от истинных абсолютных значений силы тяжести. Однако окончательный и всеобщий переход к новой системе следует осуществить через несколько лет, когда будут закончены ведущиеся сейчас в нескольких местах абсолютные определения силы тяжести. В табл. 6 приводим список известных нам пунктов, в которых производятся эти работы.

Таблица 6

| Пункт                    | Метод              | Авторы          |
|--------------------------|--------------------|-----------------|
| Брауншвейг (ФРГ)         | Свободное падение  | Рикман и Герман |
| Оттава (Канада)          | Свободное падение  | Престон-Томас   |
| Буэнос-Айрес (Аргентина) | Оборотные маятники | Баглиетто       |
| Хельсинки (Финляндия)    | Длинный маятник    | Кукамеки        |
| Потсдам (ГДР)            | Оборотные маятники | Рейхенэдер      |
| Медисон (США)            | Свободное падение  | Розе и Хаубрич  |
| Теддингтон (Англия)      | Свободное падение  | Кук             |

Оба метода (маятниковый и свободного падения) абсолютных определений силы тяжести ограничены в смысле повышения точности возможностями линейных измерений. Считают, что основной принципиальной трудностью метода свободного падения является точное нанесение марок на жезл и возникновение продольных колебаний системы, возникающих при пуске, достигающих величин  $10^{-6}$ . Однако имеется возможность применить такую схему измерений, при которой эти влияния будут обойдены. Хаубридж, Розе и Вуллард [5] предлагают принципиально новую модификацию способа свободного падения, исключаящую полностью линейные измерения, являющиеся во всех случаях главным источником погрешностей. Их предложение состоит в следующем: пусть в момент  $t=0$  шар начинает свободное падение из плоскости  $z=0$  (см. рисунок) в положительном направлении оси  $z$

$$z = \frac{1}{2} gt^2. \quad (1)$$

В момент  $t$  из точки  $O$  падает световой сигнал, который, отражаясь от поверхности шара, попадает на фотоумножитель  $f$ , расположенный на том же расстоянии  $S$  от шара, что и источник света  $O$ . Система источник света — фотоумножитель собрана в виде самовозбуждающегося импульсного датчика. Отраженный свет, усиливаясь в фотоумно-

жителе, возбуждает новый световой импульс. Частота этих импульсов модулируется специальным устройством.

Световой импульс, вышедший из датчика, сделает за время  $t$  путь от датчика до приемника  $2S$ . Время  $2S$  определяется равенством

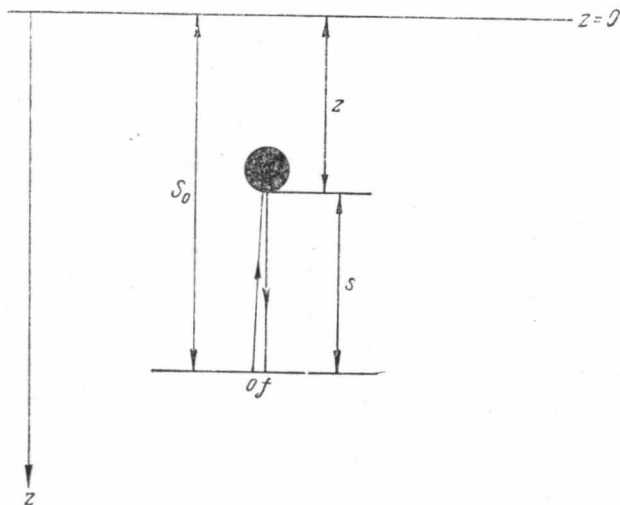
$$\Delta t = \frac{2S}{c},$$

где  $c$  — скорость света. Частота цикла будет равна величине, обратной периоду, то есть  $\nu = 1/\Delta t$ . Однако при этом надо учесть время задержки  $T_0$  электронной схемы.  $T_0$  складывается из времени задержки в фотоумножителе, в цепи и в фотоэлементе. Поэтому частота цикла будет

$$\nu = \frac{1}{\Delta t + T_0} = \frac{1}{2S/c + T_0} = \frac{c}{2S + cT_0} \quad (2)$$

Но из рисунка видно, что  $S = S_0 - z$ . Вводя это в (2) с учетом (1), получаем

$$\nu = \frac{c}{(2S_0 + cT_0) - gt^2},$$



вводя обозначения  $2S_0 + cT_0 = k$ , получим

$$\nu = \frac{c}{g} \frac{1}{k/g - t^2}.$$

Полное число циклов в интервале  $t_2 - t_1$  получим интегрированием этого выражения в пределах  $t_1 t_2$ :

$$N_{1,2} = \int_{t_1}^{t_2} \nu dt = \frac{c}{g} \int_{t_1}^{t_2} \frac{dt}{k/g - t^2} = \frac{c/g}{2\sqrt{k/g}} \left[ \ln \frac{\sqrt{k/g} + t}{\sqrt{k/g} - t} \right]_{t_1}^{t_2}$$

или

$$N_{1,2} = \frac{c/g}{2\sqrt{k/g}} \ln \frac{\sqrt{k/g} + t_2}{\sqrt{k/g} - t_2} \frac{\sqrt{k/g} - t_1}{\sqrt{k/g} + t_1} \quad (3)$$

Полученное уравнение содержит три неизвестных  $k/g$ ,  $c/g$ ,  $t_1$ . Производя наблюдения на трех интервалах  $t_2 - t_1$ ,  $t_3 - t_2$ ,  $t_4 - t_3$ , получаем три уравнения для их нахождения. Полученное из этих уравнений значение  $g$  выражается через скорость света  $c$ . Измерение длины, являющееся принципиально наиболее трудной операцией, здесь исключено полностью, а с ним исчезает важный источник погрешностей. Тот факт, что  $g$  выражено в необычной системе единиц, ничего сложного не представляет.

Указанный метод весьма перспективен и его следует применить при работах по определению абсолютного значения силы тяжести в СССР. Последнее время в литературе появились указания на возможность применения метода свободного падения в транспортабельных быстроработающих приборах [11]. Так, например, Шомандль предлагает конструкцию гравиметра, в котором сила тяжести определяется наблюдением интерференционным методом свободно падающего тела. Во всяком случае, метод свободного падения, с помощью которого Галилей впервые определил значение ускорения силы тяжести, становится на современном уровне развития техники одним из перспективных и точных методов изучения гравитационного поля.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Künen T., Furtwengler Th. „Bestimmung der absoluten Grösse der Schwerkraft zu Potsdam mit Reversions-pendeln“, P. G. J., 1906.
2. Heyl P. Trans. Amer. Geophys. Union, P. 1, 1936.
3. Clark J. Phil. Trans. Roy Soc. London, Ser. A., 238, 1939.
4. Раздымаха Г. С. Поведение маятниковых ножей и их роль в абсолютных определениях силы тяжести. Труды ЦНИИГАиК, вып. 68, 1949.
5. Haubrich R. A. Rose J. C., Woollard G. P. Trans. Amer. Geophys. Union, 39, № 1, 1958.
6. Агалецкий П. Н. и Егоров К. Н. Измерительная техника, № 6 1956.
7. Марциняк А. И. Измерительная техника, № 5, 1956.
8. Volet C. Compt. rend. 222, 1946; 224, 1947.
9. Thulin A. C. r. Acad. sci., 246, № 24, 1958.
10. Woollard G. P. Advans. Geophys., 1, 1952.
11. Шомандль К. М. Гравиметр, патент № 1011153, ФРГ, 27 июня 1957 г.
12. Abstract Report presented to the XI General assembly (Toronto, Canada) by prof. C. Morelli, 1957.

Поступила в редакцию  
26.12 1958 г.

Кафедра  
небесной механики и гравиметрии