

# УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

## ОПТИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ

**И. С. Шкловский и П. В. Щеглов**

В связи с запуском искусственных спутников Земли (И. С. З.) возникла важная проблема определения их пространственных координат для разных моментов времени путем наблюдений с поверхности Земли. Для определения координат спутника используются как радиотехнические, так и оптические методы; в этой статье мы остановимся на оптических методах. В принципе оптические методы позволяют определять координаты И. С. З. с большей, чем радиометоды, точностью. Знание точных координат И. С. З. необходимо для вычисления его орбиты. На основании таких измерений можно получить важные данные о физических свойствах верхних слоев земной атмосферы. Достаточно точные параметры орбиты спутника (которые могут быть получены только по высококачественным наблюдениям) позволяют найти распределение плотности верхних слоев земной атмосферы. Заметим, что в настоящее время отсутствуют надежные данные о распределении плотности атмосферы выше уровня 300 км. Кроме того, можно будет изучить приливные эффекты в верхних слоях атмосферы, которые, по-видимому, достигают большой величины. Очень важно, что можно будет обнаружить характерные отклонения распределения плотности верхней атмосферы от сферической симметрии.

Большое значение имеет анализ движения И. С. З. для проблемы фигуры Земли. Эта последняя задача привлекала внимание астрономов и геодезистов в течение веков. Для ее решения требуются весьма точные определения времени и координат звезд. Наблюдение И. С. З. позволяет решить эту проблему, даже если определения его координат сравнительно грубы (координаты звезд измеряются в настоящее время с точностью в несколько сотых долей угловой секунды).

Предположим, что известны координаты И. С. З. с точностью до  $10''$  и соответственно момент его пролета с точностью до нескольких миллисекунд времени (см. ниже). Принимая расстояние И. С. З. от точки наблюдения 300 км, легко подсчитать, что перемещение наблюдателя на земной поверхности на 15 метров будет соответствовать изменению угловых координат И. С. З. на  $10''$ . Таким образом, наблюдая И. С. З. с точностью в  $5''$ , можно установить координаты места наблюдения (разумеется, если орбита спутника известна) с точностью до нескольких метров, что соответствует определению географических координат пункта наблюдения с точностью до долей секунды дуги. Определение географических координат с такой точностью классическими методами астрономии потребовало бы специальных и исключительно точных наблюдений над звездами в течение длительного времени, как это и делается на больших обсерваториях. Производя наблюдения спутника в различных пунктах земного

шара, можно уточнить взаимное расположение материков и островов, что связано с решением ряда геодезических и географических проблем.

Следует отметить, что в последнее время при наблюдениях солнечных затмений стали проводиться работы по «связыванию» координат удаленных пунктов, но точность затменной методики оказалась не очень высокой.

Решение геофизических и геодезических задач является лишь одно из областей использования точных координат И. С. З.; возможны также и другие применения (например, исследование аномалий гравитационного поля Земли, проверка эффектов общей теории относительности<sup>1</sup>).

Для наблюдателя, находящегося на земной поверхности, искусственный спутник Земли представляет собой (если он освещен Солнцем) сравнительно слабый, практически точечный объект, движущийся по небесному своду с довольно значительной угловой скоростью. Звездную величину И. С. З. легко вычислить, зная его эффективную отражающую поверхность, коэффициент отражения и расстояние до спутника. Так, для

Расстояние от наблюдателя в км	Фотовизуальная звездная величина $m$	Угловая скорость в $^{\circ}/\text{сек}$
360	5,7	88
720	7,2	42
1080	8,1	27
1440	8,7	19
1800	9,2	15
2160	9,6	12
2700	10,1	9

И. С. З диаметром 50 см и зеркально отражающего, вычисления дают следующие значения звездной величины<sup>2</sup>. Наблюдения искусственных спутников Земли показывают, что теоретические оценки хорошо согласуются с наблюдаемыми значениями звездной величины спутника.

Имеется любопытная возможность значительно увеличить яркость И. С. З. в сумеречных условиях. Речь идет о выбрасывании из «основного» спутника «дополнительного» спутника, представляющего собой баллон из тонкой алю-

минированной пленки<sup>3</sup>. В настоящее время осуществлен такой баллон, весящий при диаметре 75 см вместе с устройством для наполнения его газом 300 г. Не представляет принципиальных затруднений осуществить подобного рода баллон существенно большего размера при сравнительно небольшом весе. Сферическая форма баллона сохраняется благодаря наличию алюминиевой фольги, а не давлению газа изнутри<sup>4</sup>, так что опасности пробивания баллона микрометеорами не существует. Следует однако заметить, что такой баллон, используемый в качестве И. С. З., не может представлять сколько-нибудь значительной научной ценности. Благодаря огромному значению отношения поверхности к массе он очень быстро затормозится и, следовательно, из анализа его движения нельзя будет получить достаточной информации о форме Земли, плотности атмосферы и пр. (так как число наблюдений будет мало).

Определение координат И. С. З. может производиться путем фотографирования изображения спутника и окружающих звезд.

Рассмотрим требования к оптической системе для фотографирования спутника. Как и в случае фотографирования метеоров, следует учитывать быстрое движение И. С. З. Для примера, рассмотрим И. С. З. 6-й звездной величины, движущийся со скоростью  $1^{\circ}/\text{сек}$ , фотографируемый при помощи инструмента с фокусным расстоянием 0,5 м. Пусть качество оптической системы инструмента достаточно высоко и диаметр изображения звезды определяется только рассеянием света в эмульсии фотопластиинки. У современных высокочувствительных фотоэмulsionий диаметр кружка размытия приблизительно равен 30  $\mu$ , что соответствует разрешающей способности 30 линий/мм. За одну секунду изображение И. С. З. будет проходить в фокальной плоскости камеры путь 10 мм; (если каме-

ра неподвижна), каждая точка следа спутника будет экспонироваться в течение времени, необходимого для прохождения изображения спутника через кружок размытия фотопластинки, т. е. около 1/300 сек. Таким образом, камера для регистрации И. С. З. должна зарегистрировать за 1/300 сек неподвижную звезду б-й величины.

Аналогичный расчет легко выполнить для любых оптических систем; следует только обращать внимание на диаметр изображения, даваемого системой. Вообще эффективность фотографического телескопа при регистрации движущегося объекта (при одинаковом качестве даваемого оптического изображения) зависит от параметра  $\frac{D^2}{F}$ , где  $D$ —диаметр объектива, а  $F$ —его фокусное расстояние\*).

Для фотографических наблюдений И. С. З. в США была разработана специальная установка, представляющая собой камеру Шмидта ( $D=50$  см;  $F=50$  см). Качество изображения, даваемое этой установкой, достаточно высоко; диаметр изображения звезды не превосходит 30  $\mu$  даже на краю поля зрения. Фотографирование ведется на полоске 55-мм кинофильма длиной около 30 см; камеру можно вращать вокруг ее оси, устанавливая длинную сторону кадра в направлении движения спутника.

Точность измерения относительных положений изображения И. С. З. и звезд может достигать  $\pm 3 \mu$ , что соответствует точности определения угловых координат с точностью  $\pm 1'',5 \div 2''$ . Следует отметить, что для проведения точных измерений предпочтительнее вести фотографирование на фотопластинках. Однако из-за кривизны поля и необходимости быстрой смены кадров применить их в описываемой установке не удалось.

Точность измерения координат И. С. З. зависит от точности регистрации момента съемки. В случае недостаточной скорости срабатывания затвора конец следа спутника на фотопластинке получится размытым, что затруднит наведение на него нитей измерительного прибора. Точность регистрации момента начала и конца экспозиции в описываемой установке равна нескольким десятым миллисекунды. На каждой установке имеются кварцевые часы, синхронизируемые сигналами точного времени радиостанции WWV. Секунды, десятые и сотые доли секунды регистрируются путем фотографирования циферблата этих часов при свете электронной вспышки, срабатывающей в момент начала и конца экспозиции. Кроме механического циферблата, на кварцевых часах имеется «электронный» циферблат, представляющий собой электронно-лучевую трубку с круговой разверткой, отсчет на которой производится с точностью до  $10^{-4}$  сек. В момент начала и конца экспозиции электронный луч включается, и экран осциллографа фотографируется<sup>3</sup>.

Географические координаты места установки камеры должны быть известны с высокой точностью.

Предполагалось разместить 12 подобных установок в различных пунктах земного шара.

В настоящие времена (ноябрь 1957 г.) нет данных об испытании этих камер при наблюдении советских искусственных спутников Земли; по-видимому, монтаж всех установок не был закончен к началу запуска советского И. С. З.

Помимо описанных выше установок, в США организована сеть визуальных наблюдений спутника<sup>4</sup>. Визуальные наблюдения проводятся при помощи небольших телескопов с диаметром объектива 50—70 мм, увеличением  $6\times \div 10\times$  и полем зрения  $8\div 11^\circ$ . В такие небольшие телеско-

\* ) Так как количество света, собираемого объективом, пропорционально квадрату его диаметра, а длина трека, оставляемого спутником на фотопластинке,—фокусному расстоянию.

скопы можно наблюдать объекты 8÷9 звездной величины. В поле зрения телескопов имеются нити; наблюдатель замечает момент пролета И. С. З. через эти нити. Положение нитей определяется по звездам, видимым в поле зрения телескопа.

Точность подобного рода методики, естественно, гораздо меньшее точности, даваемой фотографическими наблюдениями.

В СССР организовано 66 станций визуального наблюдения И. С. З.; методика наблюдений в основном совпадает с описанной выше.

Кроме небольшого сферического спутника, наблюдения которого вследствие его малой яркости довольно затруднительны, имеют значение наблюдения больших, более ярких искусственных спутников Земли. Их наблюдения можно проводить с более простыми фотографическими установками, чем описанные выше, применяя объективы меньшего диаметра. В частности, установка для фотографирования ярких И. С. З. была осуществлена в Государственном астрономическом институте им. Штернберга В. Ф. Есиповым, В. Г. Куртом и одним из авторов настоящей статьи на базе стандартной аэрофотосъемочной камеры НАФА-Зс/25. Фотографирование ведется на фотопластинках (для повышения точности измерения координат И. С. З.). Некоторые трудности вызвало осуществление точной регистрации моментов открытия и закрытия затвора камеры. Механические контакты, установленные на движущихся деталях затвора, требуют исследования запаздывания момента замыкания контакта относительно открытия или закрытия затвора; поэтому, по предложению Ю. Н. Липского, была осуществлена непосредственная запись моментов открытия и закрытия затвора. Для этого внутри камеры рядом с фотопластинкой (на нерабочей части поля зрения камеры) было установлено серно-свинцовое фотосопротивление, освещаемое через объектив и затвор источником инфракрасного света, не влияющего на фотопластинку (рис. 1). Ток через фотосопротивление, равно как и секундные импульсы от астрономических часов, калибровочный сигнал 500 гц и моменты замыкания и размыкания контактов затвора записывались на шлейфном осциллографе. Как видно из рис. 2 и 3, открытие и закрытие затвора происходит достаточно быстро (2—3 мсек), что позволяет производить на этой камере сравнительно точные определения координат ярких И. С. З. Предельная звездная величина движущегося со скоростью 1°/сек объекта для описанной выше камеры равна 2<sup>m</sup>,5—3<sup>m</sup>\*).

Другая установка для точной регистрации момента пролета ярких И. С. З. предложена независимо сотрудником Крымской Астрофизической обсерватории АН СССР П. П. Добронравиным и сотрудником Государственного астрономического института им. Штернберга В. И. Морозом. В этом случае изображение И. С. З. проектируется объективом на непрозрачную диафрагму с прорезями, положение которых относительно изображений звезд известно. За диафрагмой устанавливается фотумножитель, ток которого записывается на самописце. Таким образом, определяется момент прохождения изображения И. С. З. через прорезь.

\* ) Не следует смешивать точность регистрации момента срабатывания затвора и точность определения абсолютного момента пролета спутника через данную точку небесного свода. Как видно из вышеизложенного, точность регистрации момента срабатывания затвора около 2 мсек, поправка же астрономических часов по отношению к абсолютному времени с такой точностью может быть получена не сразу, а иногда и вообще не может быть получена. Однако в случае использования для всех наблюдений системы единого времени какой-либо определенной службы времени, точность регистрации момента в этой системе будет определяться лишь конструкцией камеры. Сама же система может даже значительно отличаться от абсолютного времени, однако все вычисления орбиты можно вести в этой специальной системе.

В установке, предложенной В. И. Морозом, диафрагмой служит фотопластишка, на которой фотографируются звезды и трек спутника, что делает более удобным определение положения прорези и следа спутника относительно звезд.

Определение координат слабых И. С. З. может производиться также при помощи оптических приборов со сравнительно небольшим диаметром, если применяются более чувствительные, чем фотопластишка, приемники излучения. Такими приемниками могут служить электронно-оптические преобразователи (ЭОП).

Если квантовый выход современных высокочувствительных пластинок (т. е. количество зерен эмульсии, которые становятся проявляемыми при действии одного кванта излучения) не превышает  $10^{-4}$ , то квантовый

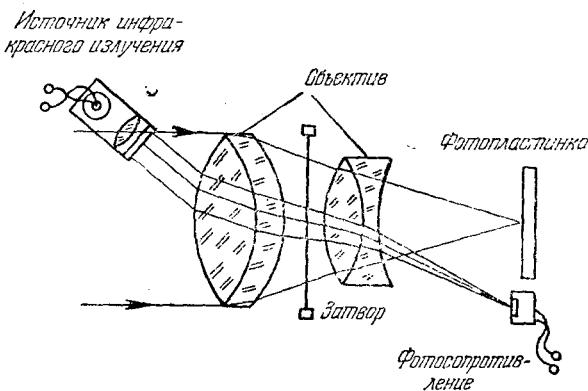


Рис. 1. Схема устройства для регистрации моментов срабатывания затвора камеры для наблюдения И. С. З.

выход современных сурьмяно-цециевых фотокатодов достигает для лучших экземпляров  $1/3$ . В настоящее время известны контактные электронно-оптические преобразователи<sup>5,6</sup>, а также многокаскадные системы<sup>7,8</sup>.

Применение таких систем, как можно показать, дает возможность увеличить чувствительность фотографирования примерно в 100 раз по сравнению с лучшими из существующих фотографических эмульсий. Разрешающая способность, современных электронно-оптических преобразователей лучше  $0,1$  мм и может быть еще повышена.

Недостатком применения ЭОП для решения данной задачи являются сравнительно небольшие размеры их рабочего поля ( $10-20$  мм). Если фокусное расстояние применяемых камер сравнительно велико, то точность предварительных определений координат должна быть соответственно повышена.

Искусственные спутники Земли обычно наблюдаются в сумеречных условиях. Учитывая, что их высота над поверхностью Земли находится в пределах  $300-1000$  км, легко вычислить, что угол погружения Солнца в местах наблюдения может доходить до  $30^\circ$ . Таким образом, в сумеречных условиях спутник можно будет наблюдать довольно длительное время перед восходом и после захода Солнца.

Недавно была высказана очень изящная идея метода, позволяющая значительно увеличить яркость И. С. З.<sup>10</sup>. Представим себе, что поверхность спутника не гладкая сферическая, а многогранная. Каждую такую грань, если она достаточно хорошо отполирована, можно считать плоским зеркалом. Эти небольшие зеркала будут отбрасывать на Землю

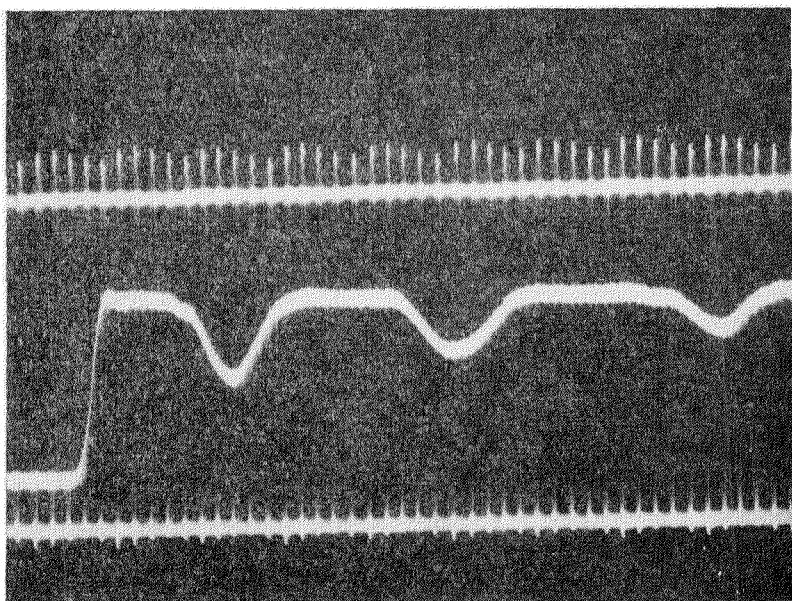


Рис. 2. Осциллограмма раскрытия затвора камеры НАФА 3с/25; калибровочный сигнал имеет частоту 500 гц. На осциллограмме видна вибрация пластинок затвора после раскрытия.

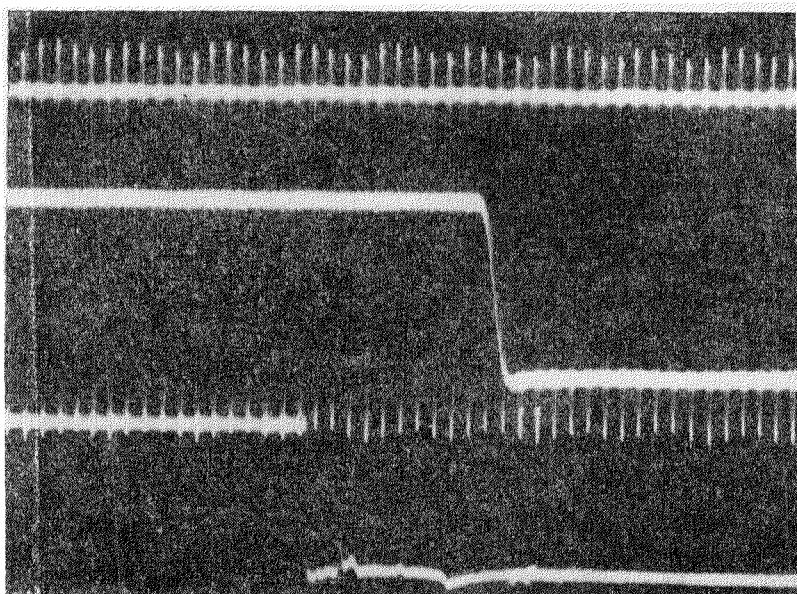


Рис. 3. Осциллограмма закрытия затвора камеры НАФА 3с/25.

солнечные «зайчики». Наблюдатель будет при некоторых условиях видеть весьма кратковременные световые вспышки довольно большой яркости. Никаких подробностей расчета в <sup>10</sup> не приводится. Мы рассчитали, что для спутника размером в несколько метров, находящегося на расстоянии 500 км от наблюдателя, на котором плоские элементы имеют поверхность 100 кв. см., звездная величина «зайчика» будет около—3<sup>m</sup>. Диаметр «зайчика» на Земле около 5 км. Если спутник совершает оборот вокруг своей оси за 1 сек, то световые импульсы будут иметь длительность около 3 мсек и следовать друг за другом приблизительно через 1 сек. Зарегистрировать такие яркие, хотя и кратковременные вспышки не представляет труда на описанных выше стандартных камерах.

Однако возникают определенные трудности с фиксированием моментов вспышек. Дело в том, что момент экспозиций отдельных точечных изображений вспышек определяется не работой затвора камеры, а вращением И. С. З. В принципе возможно регистрировать моменты вспышек при помощи вспомогательного фотоэлектрического фотометра, установленного в непосредственной близости от камеры.

Роль дифракции на краях зеркал, как показывают простые расчеты,пренебрежимо мала (радиус первого дифракционного кольца будет около 2,5 м, что существенно меньше размеров «зайчика»).

Определенную опасность при осуществлении этого проекта представляют микрометеоры. Бомбардировка зеркал-граней спутника микрометеорами может через некоторое время «испортить» их оптическую поверхность. К сожалению, мы пока мало что знаем о количестве микрометеоров. Если принять, что плотность микрометеоров в верхней атмосфере такая же, как плотность межпланетной пыли, т. е.  $10^{-21}$  г/см<sup>3</sup>, а размеры каждого микрометеора  $3 \times 10^{-4}$  см при удельном весе 3, то концентрация микрометеоров будет  $3 \times 10^{-12}$  см<sup>-3</sup>. Поток микрометеоров при скорости их  $3 \times 10^6$  см/сек будет тогда  $10^{-5}$  см<sup>-2</sup> сек<sup>-1</sup>, т. е. на каждый квадратный сантиметр за 12 суток будет попадать 1 микрометеор. По-видимому, это обеспечит сохранение зеркал в течение достаточно длительного времени. Разумеется, наши расчеты носят самый ориентировочный характер.

В конце своего движения, когда спутник, достаточно затормозившись, войдет в сравнительно плотные слои атмосферы, он сильно разогреется и затем сгорит. В последнем случае можно будет наблюдать интересное явление «искусственного метеора». Еще до сгорания сильно нагретый спутник станет самосветящимся телом и может быть наблюдаем вочных условиях. Для таких наблюдений могут быть использованы различные приемники инфракрасной радиации, как-то ЭОП с кислородно-цеизиевым фотокатодом и фотосопротивления. Большой интерес представляют спектральные наблюдения над И. С. З. во время его сгорания в земной атмосфере. В принципе такие наблюдения аналогичны спектрографированию метеоров.

Применяемые в астрономии для спектрографирования звезд призматические камеры и щелевые спектрографы не могут решить этой задачи вследствие их сравнительно большой дисперсии и малой светосилы.

Можно получить спектр И. С. З., изготовив специальные объективные призмы с небольшим преломляющим углом и используя описанные выше фотокамеры. Дисперсия и разрешающая способность при этом будут довольно малы. Однако основные качественные и, возможно, количественные характеристики спектра могут быть получены.

На рис. 4 дана фотография полета второго искусственного спутника Земли, полученная при помощи описанной в данной статье фотографической установки Государственного астрономического института

им. П. К. Штернберга В. Г. Куртом и И. В. Щегловым на Ташкентской Астрономической обсерватории.

Рядом с концами треков указаны моменты срабатывания затвора по звездному времени (точность регистрации момента 2 мсек). Средняя



Рис. 4.

квадратичная ошибка наведения нитей измерительного прибора на концы треков 4 $\mu$ , что при фокусном расстоянии камеры 250 мм соответствует 3".

На снимке видно изменение яркости спутника, происходящие вследствие его вращения.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В. Л. Гинзбург, УФН 63, вып. 1, 120 (1957).
2. K. G. Henize, Sky and Telescope 16, № 3, 108 (1957).
3. F. Whipple, J. Hunsaker, Proc. Inst. Radio Engineers, 760—761, июнь (1956); Sky and Telescope 15, № 12 (1956).
4. Sky and Telescope, XV, 12 (1956).
5. Transactions of the IX-th meeting of the IAU, 9, 693 Cambridge, 1957.
6. W. Baum, Astronomical Society of the Pacific Leaflet, № 326, 8, (1956).
7. Л. А. Гончарский, Авторское свидетельство СССР от 26 ноября 1934 г. № 43462.
8. Naturforschung und Medizin in Deutschland 15, 1939—1946, 96—98.
9. Science News Letters 19 октября 1957 г. 72 № 16, стр. 244.
10. Sky and Telescope, т. XVII, № 1, 6, ноябрь, 1957.