

УДК 523.44; 521.8/9; 520.8

**П. П. Сухов, К. П. Сухов**

Научно-исследовательский институт «Астрономическая обсерватория»  
Одесского национального университета им. И. Мечникова  
ул. Маразлиевская 1в, Одеса, 65014  
psukhov@ukr.net

**О некоторых проблемах идентификации  
геостационарных спутников  
по фотометрическим признакам**

*Рассмотрены некоторые вопросы технического и методического характера при фотометрии геостационарных спутников (ГСС), их идентификации по фотометрическим признакам. Кратко изложены известные методы отождествления геостационарных спутников по фотометрическим данным. Наличие базы фотометрических, динамических характеристик ГСС, дополнительная информация, упрощение входных данных при решении обратной задачи позволяют современным методам отождествить неизвестный ГСС с вероятностью 80 %.*

*ПРО ДЕЯКІ ПРОБЛЕМИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ГЕОСТАЦІОНАРНИХ СУПУТНИКІВ ЗА ФОТОМЕТРИЧНИМИ ОЗНАКАМИ, Сухов П. П., Сухов К. П. — Розглянуто питання технічного та методичного характеру при фотометрії геостаціонарних супутників (ГСС), їхній ідентифікації за фотометричними ознаками. Викладено відомі методи ототожнення геостаціонарних супутників за фотометричними даними. Наявність бази фотометричних і динамічних характеристик ГСС, додаткова інформація, спрощення вхідних даних при вирішенні оберненої задачі дозволяють сучасним методам ототожнити невідомий ГСС з імовірністю 80 %.*

*SOME PROBLEMS USE OF PHOTOMETRY TO IDENTIFY GEOSTATIONARY SATELLITE, by Sukhov P. P., Sukhov K. P. — It is possible to identify certain characteristics of geostationary satellites by examining their photometry. This paper reviews some of the technical problems and methodologies concerning photometry, as well as identifying photometric*

*characteristics. Existing methods of identifying geostationary satellites with photometry are also summarized. Presence Database photometric and dynamic characteristics of the GSS, additional information, simplifying the input of the inverse problem — modern methods allow identifying unknown GSS with a probability of 80 %.*

В большинстве случаев для отождествления геостационарных спутников (ГСС) достаточно орбитальных характеристик. На основе позиционных наблюдений вычисляются шесть кеплеровских элементов орбиты, положение плоскости орбиты относительно плоскости экватора или плоскости Лапласа. Но, как отмечалось в работе [9], отождествление по орбитальным параметрам компактной группы ГСС в одной орбитальной позиции или по совпадению плоскостей орбит фрагментов взрывов в ряде случаев ведет к ошибочным отождествлениям.

Роль некоординатной информации (фотометрическая, поляризационная, спектральная) также может быть ключевой для определения класса космического аппарата (КА), его функционального назначения в следующих случаях.

1. Передислокации ГСС, маневры (частые случаи), переход из консервированного состояния спутника в активное.

2. Высокоэллиптические орбиты слабо контролируются радиолокационными и оптическими наземными средствами служб контроля космоса.

3. Орбитальная плоскость ГСС из-за возмущений (Луна, Солнце, Земля, световое давление) совершает колебания относительно плоскости Лапласа с периодом 54 г. и амплитудой около 15 [9]. Старые пассивные ГСС к 2017-му г. войдут в плоскость небесного экватора. Отличить по орбитальным параметрам новый ГСС от старого, запущенного 54 года назад, будет затруднительно.

Известны следующие способы идентификации КА. 1. По орбитальным параметрам. 2. По изображению КА, полученному с помощью оптических телескопов с большим фокусным расстоянием. 3. По изображению КА при его прохождении по диску Луны или Солнца. 4. С помощью орбитальных спутников, проводящих инспекцию и фотографирование интересующих КА. 5. По анализу телеметрической и радиотехнической информации, передаваемой КА. 6. По набору отражательных характеристик в оптическом или радиодиапазоне, характеризующих каждый класс спутников.

Физические характеристики, получаемые из фотометрических наблюдений ГСС, можно разделить на три группы.

Фотометрические характеристики: 1) эффективная площадь отражения (ЭПО)  $S$ , 2) спектральный коэффициент отражения, 3) фазовый коэффициент ( $m/\text{град}$ ), 4) колор-индекс ( $CI$ ), ( $B - V$ ,  $V - R$ ), 5) звездная величина  $m$ , приведенная к стандартному расстоянию и фазовому углу ( $\alpha = 0$ ).

Оптико-геометрические характеристики: 1) линейные размеры КА, 2) доминирующая форма объекта.

Динамические характеристики ГСС: 1) период вращения вокруг центра масс или одной из осей, 2) мгновенная ориентация КА в пространстве.

Физические характеристики платформ и полезной нагрузки не всегда известны из официальных источников, либо не совсем достоверны. Однако их можно определить из фотометрических наблюдений. Трудности, имеющие место при привлечении фотометрической информации к орбитальной для идентификации, можно разделить на две группы: технические и методические.

**Технические проблемы.** 1. Слабый блеск ГСС: при фазовом угле  $> 30^\circ$  блеск ГСС очень слабый, порядка  $12-15^m$ . Поэтому желательно использовать телескопы с диаметром главного зеркала от 1 м и более. Чтобы определить отражательные характеристики ГСС, традиционно нужны длительные (полгода — год) наблюдения при разных положениях КА относительно наблюдателя. Базисные наблюдения часто ограничены погодой в пунктах наблюдений.

Но есть даты, когда для фотометрии ГСС можно эффективно использовать телескопы с размером главного зеркала 40—70 см. Это даты близ равноденствий, когда ГСС входит и выходит из тени Земли [2, 3, 5, 19]. В это время наблюдается увеличение блеска ГСС на  $5-10^m$  (так называемые «вспышки») перед входом и после выхода из тени Земли. Вспышки вызваны квазизеркальным отражением солнечного света поверхностью КА, в основном от солнечных панелей (СП). По вспышкам можно определить наличие полезной нагрузки [5], ориентацию объекта в пространстве методом, предложенным В. Епишевым [6]. Количество таких благоприятных ночей в году может быть около 80 [16].

2. Для регистрации возможных быстрых изменений блеска ГСС временное накопление фотометрических измерений должно быть минимальным, доли секунды. Для грубой фотометрии медленно изменяющих блеск стабилизированных по трем осям ГСС можно использовать ССD-матрицы, работающие в режиме накопления. Но использование такой матрицы для фотометрии быстро вращающихся вокруг центра масс некоторых классов ГСС, «кувыркающихся» пассивных ГСС, фрагментов приведет к сглаживанию малоамплитудных, периодических эффектов на кривой блеска. Наиболее подходящие светоприемники для этого: а) ССD, работающая в ТВ-режиме с регистрацией количества импульсов; б) фотометр на основе прибора мгновенного действия — ФЭУ, работающий в режиме счета импульсов. ФЭУ — одноканальный прибор, но имеет непревзойденные преимущества по коэффициенту усиления ( $>10^6$ ) и широкому динамическому диапазону ( $>10^m$ ).

3. При многоцветной фотометрии быстро изменяющих блеск ГСС временное разрешение фотометра ограничено временем переключе-

ния вращающихся светофильтров.

**Методические проблемы.** С точки зрения математической физики задачу идентификации ГСС по фотометрическим характеристикам можно решать двумя способами.

**Прямая задача.** По заданным характеристикам объекта — форме, законам отражения, отражательным свойствам его поверхности и ориентации объекта — вычисление блеска для любого момента времени имеет однозначное решение.

**Обратная задача.** Определение формы объекта по кривой блеска есть некорректная обратная задача в математической физике. Она не соответствует критериям Адамара. Известна только часть входной информации — зависимость блеска от времени  $m(t)$ . На выходе же надо получить функцию формы объекта  $F = m(t) (X, Y, Z)$ , зависящую от двух аргументов: блеска от времени  $m(t)$  и углов ориентации объекта  $(X, Y, Z)$ . В этом случае полученные результаты характерны тем, что малым изменениям входных данных могут соответствовать как угодно большие изменения полученных результатов. В общем случае решения будут неустойчивы, неоднозначны либо лишены физического смысла. Решение обратной задачи во многом зависит от наличия априорной (физической) информации об искомом решении.

Для приведения отражательных характеристик поверхности ГСС на  $\lambda = 0$  можно использовать следующие способы. 1. Можно экстраполировать диффузную составляющую кривой блеска на  $\lambda = 0$ , используя полиномиальную аппроксимацию. 2. Можно использовать алгоритм, описанный в работе [8], где блеск ГСС представляется формулой

$$m = m_0 + 2.51g \frac{S F(\alpha)}{d^2},$$

где  $m$  — звездная величина Солнца в определенном спектральном интервале,  $S$  — видимая наблюдателем поверхность КА, освещенная Солнцем,  $g$  — спектральный коэффициент отражения,  $F(\alpha)$  — фазовая функция,  $\alpha$  — спутникоцентрический фазовый угол,  $d$  — топоцентрическое расстояние до КА,  $S_0$  — ЭПО. Все входящие в формулу величины, кроме  $S_0$ , могут быть надежно измерены или рассчитаны из наблюдений. Величина  $S_0$  носит вероятностный характер. Некорректность её определения влечет ошибки вычисления других физических характеристик КА.

Используемые разными экспертами методы идентификации КА зависят от наличия априорной информации о наблюдаемом объекте. Поэтому количество критериев для отождествления КА может быть разным. Кратко опишем наиболее известные методы классификации ГСС с привлечением фотометрической информации экспертами СНГ. Методы отождествления ГСС западными специалистами в печати не приводятся.

1. Метод идентификации как низко-, так и высокоорбитальных ИСЗ, разработанный в Ужгороде (В. Епишев, И. Мотрунич, Я. Мотру-

нич, И. Найбауер и др.) базируется на комплексном подходе к решению задачи. Использование результатов фотометрии обязательно с данными позиционных наблюдений и по возможности с привлечением колориметрии и поляриметрии. Это позволяет определить ориентацию аппарата и отдельных фрагментов его поверхности не только в пространстве, но и относительно наблюдателя и плоскости орбиты КА. Авторами разработаны девять критериев и пути их установления, которые даже при полном отсутствии априорной информации о КА позволяют достичь вероятности идентификации КА порядка 80 % [7].

2. Ключевой характеристикой метода А. Муртазова, Н. Носовой, В. Куприянова (Рязань), В. Прокофьевой (КрАО) является *СИ* неизвестного КА. Он сравнивается с *СИ* известных классов объектов. При отсутствии схожести *СИ* следует привлекать фазовый коэффициент. Далее идет сравнение с результатами математического моделирования для разных геометрических форм, привлекается моделирование поля рассеяния [10, 11].

3. Главная идея метода А. Диденко, Б. Демченко, Л. Усольцева и др. (Алматы) заключается в создании банка эталонных данных «фотометрических фазовых портретов» каждого класса ГСС. Фазовый портрет неизвестного ГСС сравнивается с данными банка по определенным критериям. При невозможности отождествления объекта для последнего создается фазовый портрет нового типа КА [15]. Процедура идентификации включает в себя следующие параметры: фазовый коэффициент, геометрическое альбедо, ЭПО, спектральный коэффициент отражения, период изменения блеска. Применяются методы теории распознавания образов.

4. Метод М. Смирнова и А. Багрова, В. Выгона и др. (Москва) построен на изучении поля рассеяния, формируемого отдельными элементами конструкции спутника. Реализация данного метода требует длительного наблюдения КА при разных [14]. Привлекается математическое моделирование. А. Багров также предлагает привлекать спектральные наблюдения ГСС для определения химического состава поверхности покрытия КА [1]. Но получить спектр с высоким разрешением слабого по блеску ГСС — технически сложная задача, и возможно поэтому идея не получила широкого распространения.

5. А. Добровольский, А. Коробко и др. (Одесса) рассматривают только предварительный этап идентификации по кривым блеска, в котором кривые блеска делятся на две группы: непериодические и периодические. Каждая из групп делится на несколько подклассов. Но не разработано соответствие между классами кривых и классами КА [17].

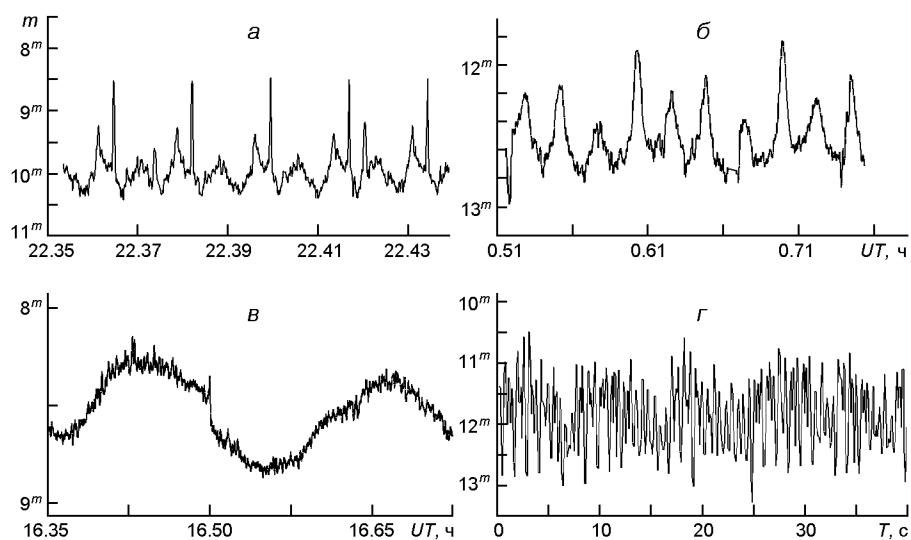
Из кратко изложенных методов следует вывод: решение некорректной задачи идентификации ГСС по фотометрическим данным — процедура не простая, требующая привлечения дополнительной информации о КА. Дополнительной информацией может быть: внешний вид КА, его размеры, место, дата запуска, наклон орбиты к экватору и

его эволюция, мощность, вырабатываемая СП, размеры обтекателя головки спутника и т. д.

На начало XXI века основные системы КА остались теми же, что и в 1980-е гг. Формы КА не отличаются особым разнообразием, их конструкция изменяется медленно. Развитие в основном идет в направлении улучшения характеристик. Как отмечалось многими исследователями, у каждого класса ГСС могут быть конструктивные и динамические особенности, которые проявляются на форме кривой блеска и имеют характерный вид (*signature*). Например, блики от сканирующей оптики, время вращения вокруг оси, тип стабилизации, тип платформы, размах солнечных панелей и др. Такие особенности помогают классифицировать КА по кривой блеска. Ниже, не вдаваясь в анализ, показаны кривые блеска нескольких геостационарных объектов с характерными конструктивными и динамическими особенностями, свойственные соответствующим классам КА. Объекты наблюдались авторами в рассчитанное время для максимальных вспышек.

В последнее время для отождествления ГСС многие эксперты используют фотометрическую базу данных (БД), содержащую набор характеристик, с достаточной вероятностью характеризующих конкретный класс КА. Составление такой БД — проблема времени и использования единой методики определения физических характеристик КА.

В работе [4] указывается, что эффективная отражательная площадь является достаточно важным показателем, который может быть использован при идентификации типа ГСС. Наблюдаемая звездная величина ГСС в основном зависит от двух параметров: ЭПО и фазового угла. Логично использовать ЭПО в качестве первостепенной характеристики при идентификации КА. Величина ЭПО позволит



Кривые блеска геостационарных объектов разных классов: *a* — SBIRS GEO 2 (29/30 августа 2014 г.), *б* — DSP 18 (28/29 сентября 2014 г.), *в* — «Mentor 4» (13/14 октября 2014 г.), *г* — «кувыркающаяся» ракета-носитель «Milstar 5R» (28/29 сентября 2014 г.)

приблизительно оценить, к какому классу относится объект. Вычисления  $S$  по диффузной части кривой блеска желательнее приводить на фазовый угол  $\alpha = 25$  или  $30$ , это упрощает процедуру. При этих значениях блеск КА изменяется линейно.

Следующей важной характеристикой может быть фазовый коэффициент  $\alpha$  и  $CI$ . Дальнейшая процедура определения иных физических характеристик КА зависит от конечной задачи. Иногда для подтверждения идентификации ГСС достаточно определить одну-две динамические или отражательные характеристики.

Большая фотометрическая БД стандартизованных ( $B, V, R$ ) характеристик многих классов ГСС составлена и поддерживается в Астрофизическом институте им. Фесенкова (Алматы, Казахстан). Аналогичная БД Астрономической обсерватории ОНУ им. И. Мечникова (Одесса, Украина) содержит более 800 кривых блеска более 120 ГСС и ежегодно пополняется. База данных станции «Космотен» (Россия) имеет несколько тысяч кривых блеска многих классов КА. Интенсивно проводятся фотометрические, спектральные, поляризационные наблюдения разных классов КА на базе AF USA — AMOS (Air Force Maui Optical and Supercomputing [18]). Но результаты этих работ пока неизвестны.

**Заключение.** Наличие фотометрической БД, дополнительная информация, упрощение входных данных при решении обратной задачи, в комплексе с орбитальной информацией позволяют современными методами с вероятностью 80 % классифицировать неизвестный ГСС [7].

1. Багров А. В. Околосемная астрономия: исследование искусственных и естественных небесных тел в околосемном космическом пространстве: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — М., 2002.—С. 98—106.
2. Диденко А. В., Усольцева Л. А. Определение оптических характеристик геостационарных спутников и земной атмосферы по их наблюдениям на границах земной тени // Космич. исслед. в Казахстане. — Алматы: КазГосИНТИ, 2002.—С. 355—373.
3. Диденко А. В., Усольцева Л. А. О возможности использования кривых изменения блеска ИСЗ на границах земной тени при его идентификации // Первые Фесенковские чтения «Современная астрофизика: традиции и перспективы». — Алматы, 2005.—С. 75—76.
4. Диденко А. В., Усольцева Л. А. Использование эффективной площади отражения геостационарного спутника при идентификации его типа // Изв. НАН РК. Сер. физ.-мат.—2007.—№ 4.—С. 18—24.
5. Диденко А. В., Усольцева Л. А. Результаты анализа диффузной и зеркальной составляющих кривых блеска ГСС «Радуга» // Изв. НАН РК. Сер. физ.-мат.—2008.—№ 4.—С. 96—99.
6. Епишев В. П. Определение ориентации ИНТ в пространстве по их зеркальному отражению // Астрометрия и астрофизика.—1983.—Вып. 50.—С. 89—93.
7. Епишев В. П., Исаак И. И., Мотрунич И. И. и др. Идентификация искусственных космических объектов: пути решения // Околосемная астрономия: Сб. тр. — М.: ГЕОС, 2005.—С. 267—273.

8. *Епишев В. П., Карпенко Г. Ф., Сухов П. П. и др.* Определение эффективной площади отражения и размера некоторых геостационарных спутников по кривой блеска // *Околосемная астрономия 2009: Сб. тр.* — М.: ГЕОС, 2010.—С. 87—92.
9. *Киладзе Р. И., Сочилина А. С.* Теория движения геостационарных спутников. — С.-Пб: ООО ВВМ, 2008.—132 с.
10. *Курьшев В. И., Муртазов А. К.* Физическое моделирование полей рассеивания геостационарных спутников // *Наблюд. искусств. небес. тел.*—1985.—С. 28—32.
11. *Муртазов А. К.* Экология околосемного космического пространства. — М.: Физматлит, 2004.—304 с.
12. *Северный С. А., Смирнов М. А., Багров А. В.* Определение формы искусственного спутника Земли по фотометрическим наблюдениям // *Науч. инфор.*—1986.— № 58.—С. 103—105.
13. *Смирнов М. А.* Фотометрические наблюдения искусственных небесных тел: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — М., 1994.—163 с.—Машинопись.
14. *Africano J., Kervin P., Sydney P., et al.* Understanding photometric phase angle corrections // *Proceedings of the Fourth European Conference on Space Debris, (18—20 April 2005, Darmstadt, Germany).* — Noordwijk, Netherlands: ESA Publ. Division, P.141—146.
15. *Didenko A. V., Usoltzeva L. A.* Methods of geostationary satellites' identification by the photometric information // *Transaction of Kazakh-Amer. Univ.*—2001.—N 2.— P. 83—91.
16. *Karpenko G. F., Murnikov B. A., Sukhov P. P.* The conditions of an active equatorial GSS entering the Earth's shadow // *Odessa Astron. Publs.*—2009/2010.—**22**.— P. 25—28.
17. *Korobko A. A., Dobrovolsky A. V., Medvedev Y. A., et al.* Numerical parameters of SO light curve determining its classification attributes // *Gamov memorial international conference.* — Odessa, 1999.—P. 122.
18. *Nishimoto D., Kissel K. E., Africano J. L., et al.* The Maui Space Surveillance Site infrared calibration sources // *Proceedings of the 1993 Space Surveillance Workshop. Project Report STK-206 / Eds R. W. Miller, R. Sridharan.* — Lincoln Laboratory Massachusetts Institute of Technology, 1993.—Vol. 1.— F19628-90-C-0002.—P. 1—10.
19. *Sukhov P. P., Karpenko G. F., Epishev V. P., Motrunych I. I.* Photometrical research of GSS «Intelsat 10-02» // *Odessa Astron. Publs.*—2009/2010.—**22**.—P. 55—59.

Статья поступила в редакцию 29.05.14