

## УСРЕДНЕННЫЕ ФАЗОВЫЕ КРИВЫЕ БЛЕСКА ДЛЯ НЕКОТОРЫХ ТАКСОНОМИЧЕСКИХ ТИПОВ АСТЕРОИДОВ

© 2025 Т. А. Виноградова<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, 191187 Россия

Поступила в редакцию 9 января 2025 года; после доработки 16 июня 2025 года; принята к публикации 5 августа 2025 года

В работе предложен метод построения усредненных фазовых кривых блеска для разных таксономических типов астероидов. Метод использует большое количество опубликованных в каталоге Центра малых планет астрометрических наблюдений, для которых одновременно была измерена также видимая звездная величина астероида в визуальной полосе спектра. Были отобраны тысячи астероидов каждого из таксономических типов S, C, E, V, Q, L, D, X и проведено численное интегрирование уравнений движения, в процессе которого для каждого наблюдения была определена составляющая видимой звездной величины, зависящая от фазового угла. Для астероидов одного типа выполнено усреднение всех полученных значений по углу фазы. В результате построены усредненные фазовые кривые, характеризующие каждый таксономический тип. Использование большого количества наблюдений позволяет хорошо продемонстрировать характер оппозиционного эффекта для разных типов. Отмечен сдвиг фазовых кривых относительно нулевого значения при нулевом угле фазы. Сдвиг зависит от размера астероидов и различается для разных таксономических типов. Наличие такого сдвига говорит о систематической ошибке публикуемой в каталоге Центра малых планет абсолютной звездной величины астероидов.

Ключевые слова: *малые планеты, астероиды: общие сведения — методы: численные — фотометрия*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Под фазовой кривой блеска астероида  $V(\alpha)$  понимается зависимость блеска астероида от фазового угла, который определяется как угол Земля–астероид–Солнце. Естественным образом блеск астероида ослабевает с ростом фазового угла, поскольку увеличивается часть поверхности астероида, не освещенная Солнцем. Видимая звездная величина астероида в оптической области спектра может быть представлена как

$$V = H + 5 \log(rd) + V_\alpha.$$

Здесь  $H$  — абсолютная звездная величина астероида,  $r$  и  $d$  — расстояния от астероида до Солнца и до Земли в астрономических единицах,  $V_\alpha$  — составляющая, зависящая от угла фазы  $\alpha$ . Кроме того,  $V$  включает в себя некоторую величину, которая представляет собой вклад неизвестных факторов, влияющих на блеск астероида, а также непосредственно ошибки наблюдения. К неизвестным факторам в данном случае следует отнести колебания блеска, вызванные вращением астероида неправильной формы.

Абсолютная звездная величина астероида  $H$  определяется как его видимая величина  $V$  при условии, что  $r = 1$  а. е. и  $d = 1$  а. е., а фазовый угол  $\alpha = 0^\circ$ . В данной работе использованы значения  $H_{\text{МРС}}$ , представленные на сайте Центра малых планет (ЦМП)<sup>1</sup>.

До 1980-х годов предполагалось, что фазовая функция  $V(\alpha)$  может быть представлена в виде линейной зависимости от угла  $\alpha$ . Позднее выяснилось, что эта зависимость имеет более сложный вид. Gehrels (1956) впервые обнаружил нелинейное увеличение блеска вблизи оппозиции, которое получило название «оппозиционный эффект». Были предложены различные функции для описания фазовых зависимостей блеска астероидов с учетом указанного эффекта.

До недавнего времени использовалась двухпараметрическая « $H-G$ »-функция (Bowell et al., 1989), которая позволяет описать изменение блеска астероида в диапазоне фазовых углов от  $0^\circ$  до  $120^\circ$ . Параметр  $G$ , так называемый параметр наклона, был определен лишь для малого количества

\*E-mail: vta@iaaras.ru

<sup>1</sup>[www.minorplanetcenter.net](http://www.minorplanetcenter.net), версия 2024 FEB.01.

астероидов. В последние годы эта система подверглась критике, и в настоящее время рекомендуется использовать трехпараметрическую фазовую функцию (Muinonen et al., 2010).

Получение фазовой кривой является достаточно сложной задачей, поэтому число астероидов с известными фазовыми зависимостями блеска росло очень медленно. Только в последние годы появились работы, в которых сообщалось об определении параметров фазовых кривых сразу для тысяч и даже сотен тысяч астероидов (Vereš et al., 2015; Mahlke et al., 2021; Martikainen et al., 2021).

С другой стороны, к настоящему времени для астероидов накоплено огромное количество фотометрических данных, таких, как видимая звездная величина, определяемая при наблюдении астероида и публикуемая вместе с астрометрическими координатами в каталоге наблюдений астероидов ЦМП. Данные этих наблюдений не позволяют получить достаточно гладкую фазовую кривую для отдельного астероида, но могут быть использованы для построения некоторой усредненной фазовой кривой для астероидов одного таксономического типа.

Астероиды одного типа, вероятно, имеют сходную структуру поверхности, поэтому можно было предположить, что при увеличении угла фазы блеск этих астероидов будет ослабевать одинаково. Действительно, это было подтверждено в работах Belskaya and Shevchenko (2000) и Shevchenko et al. (2019).

Для деления астероидов по типам (физическими свойствам) в настоящее время чаще всего используются две системы классификации: Толена (Tholen and Barucci, 1989) и Баса (Bus, 1999).

До 2012 года таксономические данные имелись примерно для 2200 астероидов (Neese, 2010), но затем в базе данных NASA SBN<sup>2</sup> были опубликованы результаты обзора SDSS<sup>3</sup> (Hasselmann et al., 2011), которые увеличили их число сразу до 63 тысяч.

Для построения усредненных фазовых кривых из разных источников были собраны данные о таксономии для 65.5 тысячи астероидов. Использовалась классификация Толена, согласно которой астероиды делятся на 14 различных таксономических типов. Наиболее распространенными являются типы S, C, L, Q, D, X, V.

Поскольку в данной работе проводится статистическая обработка данных, то имеется возможность расширить список рассматриваемых объектов, включив в него астероиды, которые принадлежат к нужному таксономическому типу лишь

с некоторой, достаточно большой, вероятностью. Для этого можно воспользоваться данными о семействах астероидов с однородным составом населения. Семейства астероидов являются обломками разрушившегося родительского тела, и поэтому члены семейства, как правило, принадлежат к одному таксономическому типу.

Необходимость в привлечении семейств становится особо острой при построении фазовой кривой для Е-астероидов. Поскольку обнаружено всего несколько астероидов этого типа, для построения были использованы все астероиды, принадлежащие к семейству Бенгрия.

Число астероидов, относящихся к каждому из наиболее распространенных таксономических типов, в настоящее время исчисляется тысячами. Такого количества достаточно для построения гладкой фазовой кривой, которая будет характеризовать конкретный тип в целом.

Статья организована следующим образом. В разделе 2 описан метод построения фазовых кривых, лежащий в основе работы. Фазовые кривые, построенные для астероидов разного типа, рассматриваются в разделе 3. В разделе 4 речь идет о приведении наиболее различающихся фазовых кривых к общему началу для более наглядного их сравнения. Раздел 5 посвящен анализу фазовых кривых, построенных для крупных и мелких астероидов трех разных типов, имеющих наибольшие отличия. Сравнение полученных нами результатов с данными из литературы приведено в разделе 6. В Заключении кратко суммируются итоги работы.

## 2. МЕТОД

Мы сформировали списки по типу астероидов и для каждого из них взяли с сайта ЦМП<sup>1</sup> все необходимые данные (орбитальные элементы, абсолютные звездные величины астероидов и т.д.). Заметим, что благодаря применению фильтров при наблюдениях астероидов в последние десятилетия, имеются оценки блеска астероидов в различных полосах спектра, но в настоящей работе использованы только наблюдения с измерениями звездной величины в полосе фильтра  $V$ .

С использованием элементов орбит, опубликованных в ЦМП, мы провели численное интегрирование уравнений движения астероидов с учетом возмущений от всех планет. В процессе интегрирования для каждого наблюдения были вычислены расстояния от астероида до Земли и до Солнца ( $d$  и  $r$  соответственно), а также фазовый угол  $\alpha$ .

Полученные величины позволяют определить вклад эффекта фазы  $V_\alpha$  в наблюдаемую звездную величину  $V$ . Для этого из  $V$  необходимо вычесть

<sup>2</sup><https://pds-smallbodies.astro.umd.edu/>

<sup>3</sup>Sloan Digital Sky Survey.

абсолютную звездную величину  $H$  и влияние расстояний от астероида до Солнца и Земли:

$$V_\alpha = V - H - 5 \log(rd).$$

Для отдельного астероида величина  $V_\alpha$ , вычисленная при одинаковых  $\alpha$ , но для разных моментов времени, может варьироваться в больших пределах. Если не принимать во внимание погрешности наблюдений, то в качестве основных факторов, влияющих на разброс значений  $V_\alpha$ , следует назвать неправильную форму астероида и его вращение.

При большом числе наблюдений на длительном интервале времени эти факторы можно рассматривать как случайные величины. Чтобы свести их вклад к минимуму, мы объединили в общий массив вычисленные значения  $V_\alpha$  для разных астероидов одного таксономического типа, а затем усреднили полученные данные по фазовому углу. Шаг по  $\alpha$  варьировался. Обычно мы устанавливали его равным  $0^\circ.5$ , но вблизи оппозиции уменьшали до  $0^\circ.1$  для более точного определения оппозиционного эффекта. В результате были построены графики усредненной фазовой кривой  $V(\alpha)$  для разных таксономических типов. Одна точка на графике, как правило, соответствует десяткам тысяч наблюдений.

Интервал фазовых углов, на котором построены кривые, не очень велик, поскольку большинство астероидов принадлежит к главному поясу. Такие астероиды не могут приближаться близко к Земле, поэтому они наблюдаются лишь при относительно небольших фазовых углах, приблизительно до  $30^\circ$ .

Вблизи оппозиции, при минимальных фазовых углах, проводится мало наблюдений астероидов. Из-за этого абсолютная звездная величина  $H$  вычисляется обычно экстраполированием на основе фотометрических наблюдений, полученных вблизи оппозиции, но при ненулевых фазовых углах, посредством моделирования фазовой кривой. Публикуемые в каталоге ЦМП значения  $H_{\text{MPC}}$  вычисляются с использованием функции Буэлла с предполагаемым значением параметра  $G = 0.15$ .

При построении усредненной фазовой кривой не делается каких-либо допущений относительно ее формы. Предполагается только, что фазовые кривые одинаковы или близки по форме для астероидов одного таксономического типа, а колебания блеска, вызванные вращением астероидов, в данной задаче можно рассматривать как случайные величины.

Если эти предположения верны и используемая  $H_{\text{MPC}}$  вычислена правильно, то полученная при усреднении  $V(\alpha)$  должна быть равна нулю при нулевой фазе:  $V(0) = 0$ . Любое заметное отклонение от нулевого значения будет говорить о наличии

систематической ошибки абсолютной звездной величины астероидов, публикуемой в ЦМП.

Некоторое время назад такое несоответствие между значениями  $H_{\text{MPC}}$  и собственными результатами, действительно, было обнаружено несколькими авторами (Jurić et al., 2002; Pravec et al., 2012; Vereš et al., 2015).

### 3. ПОСТРОЕНИЕ ФАЗОВЫХ КРИВЫХ ДЛЯ РАЗНЫХ ТИПОВ АСТЕРОИДОВ

#### 3.1. S-тип

При построении усредненной фазовой кривой для таксономического типа S из разных источников было отобрано более 19 тысяч астероидов этого типа. В соответствии с процедурой, описанной в предыдущей главе, для каждого из этих астероидов из каталога наблюдений ЦМП были выбраны нужные наблюдения, произведено численное интегрирование и вычислены фазовый угол  $\alpha$  и величина  $V_\alpha$  для каждого наблюдения.

На рис. 1 показано, как распределены по углу фазы вычисленные значения  $V_\alpha$ , изображенные на графике в виде серых точек. Здесь были использованы только астероиды с абсолютной звездной величиной  $H < 11^m$ . Это довольно крупные астероиды, диаметр которых превышает 19 км, при предположении, что их альбедо равно 0.2.

Обращает на себя внимание большой разброс вычисленных значений. Отклонение от среднего значения в некоторых случаях достигает  $6^m$ , но в основном значения  $V_\alpha$  лежат в пределах полосы шириной около  $2^m$ . Отсюда можно заключить, что вариации блеска астероидов, вызванные их вращением, как правило, не превышают такой величины.

Вследствие большого разброса  $V_\alpha$  формальная ошибка, возникающая при вычислении средних значений, будет значительной, но не отразит реальную точность вычислений, поскольку представляет собой лишь усредненное значение амплитуды кривых блеска всех используемых астероидов.

Все полученные значения  $V_\alpha$  (более 180 тысяч) были собраны в один массив, и произведено их усреднение по углу фазы. Усредненная фазовая кривая для астероидов с  $H < 11^m$  показана на рис. 1 сплошной линией. Можно видеть, что при увеличении угла фазы от  $0^\circ$  до  $30^\circ$  блеск астероидов ослабевает примерно на  $1^m$ .

Аналогичная фазовая кривая на рис. 2а была построена для всех более чем 19 тысяч астероидов типа S. Полученный массив включил около четырех миллионов наблюдений. Для вычисления одного среднего значения на выбранном интервале фазового угла, то есть для построения одной точки на графике, использовались десятки тысяч

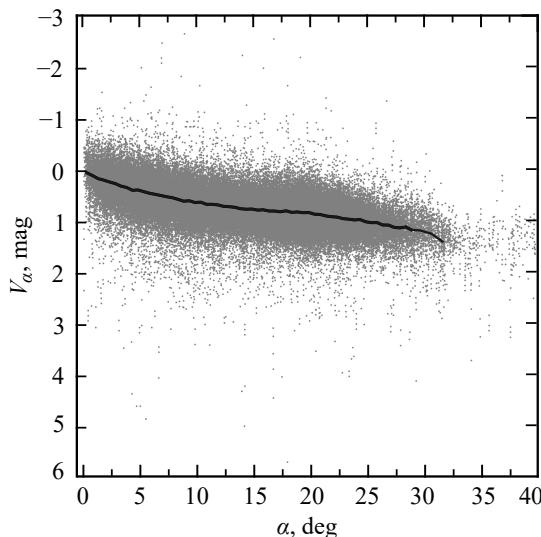


Рис. 1. Распределение  $V_\alpha$  по углу фазы для S-астероидов с  $H < 11^m$ . Сплошной линией показана усредненная фазовая кривая.

наблюдений. На некоторых интервалах число используемых наблюдений превышало 100 тысяч. В результате получена достаточно гладкая фазовая кривая.

Хорошо видно, что блеск S-астероидов ослабевает не по линейному закону. В качестве линейного можно принять только участок кривой при фазовых углах  $\alpha > 10^\circ$ . При меньших углах хорошо заметен оппозиционный эффект — нелинейное усиление блеска при уменьшении угла фазы. В непосредственной близости от оппозиции блеск астероидов нарастает очень быстро.

Следует также обратить внимание на то, что полученная при усреднении функция  $V(\alpha)$  не равна нулю при нулевой фазе. Такое смещение фазовой кривой вверх от нулевого значения указывает на то, что для S-астероидов используемая  $H_{MPC}$  в среднем завышена на величину  $0^m.2$ . В то же время рис. 1 показывает, что для крупных астероидов с  $H < 11^m$  фазовая кривая не смещена.

### 3.2. С-тип

При отборе астероидов типа С из списка были исключены все астероиды, входящие в семейство Венгрии. Дело в том, что, как было показано Vinogradova (2020), в данном семействе астероиды типа С в действительности должны быть отнесены к типу Е.

В результате были отобраны около 20 тысяч астероидов С-типа, для них вычислены три миллиона значений  $V_\alpha$ . После усреднения была получена фазовая кривая, график которой показан на рис. 2b.

Для сравнения на рисунке приведен график для S-астероидов. Можно видеть, что фазовые кривые различаются. При углах  $\alpha > 10^\circ$  график для С-астероидов практически линейный, при меньших углах его характер меняется. Вблизи оппозиции на интервале  $\alpha < 3^\circ$  усиление блеска происходит почти по линейному закону.

Кроме того, так же как и для S-астероидов, полученная при усреднении  $V(\alpha)$  не равна нулю при нулевой фазе. График фазовой кривой тоже смещен вверх от нулевого значения, но величина смещения меньше.

### 3.3. Е-тип

Астероиды типа Е характеризуются чрезвычайно высоким альбедо, достигающим величины 1.0. Количество астероидов, отнесенных к этому типу очень мало, около десятка, но, как уже было отмечено выше, существует целое семейство астероидов данного типа — это семейство Венгрии. Главный астероид популяции — (434) Hungaria — принадлежит к Е-типу, поэтому предполагается, что и все семейство состоит из астероидов такого же типа.

Тем не менее большинство астероидов в этой области, для которых определялся таксономический тип, были отнесены к типам С и Х. Наличие большого количества астероидов С-типа в самой внутренней области пояса астероидов потребовало специального исследования. В работе Vinogradova (2020) было показано, что в действительности астероиды С-типа, так же как и Х-типа, в семействе Венгрии следует отнести к типу Е.

Данные о составе этого семейства были опубликованы (Vinogradova, 2019), но за время, прошедшее с момента этой публикации, было открыто большое количество новых астероидов. Поэтому для обновления списка астероидов, принадлежащих к семейству, был проведен поиск, в результате которого найдено около 25 тысяч членов этого семейства. Из полученного списка были исключены астероиды других таксономических типов, а также астероиды с малым альбедо.

В каталоге ЦМП для этих астероидов было найдено 776 тысяч наблюдений с измеренной видимой звездной величиной. Построенная усредненная фазовая кривая на рис. 2c характеризуется практически линейной зависимостью от угла фазы вплоть до угла  $\alpha = 2^\circ$ . При  $\alpha < 2^\circ$  наблюдается сильный оппозиционный эффект.

Особенностью фазовой кривой для типа Е является то, что в отличие от двух предыдущих типов ее график смещен вниз от нулевого значения при  $\alpha = 0^\circ$ , то есть для таких астероидов  $H_{MPC}$  в среднем занижена.

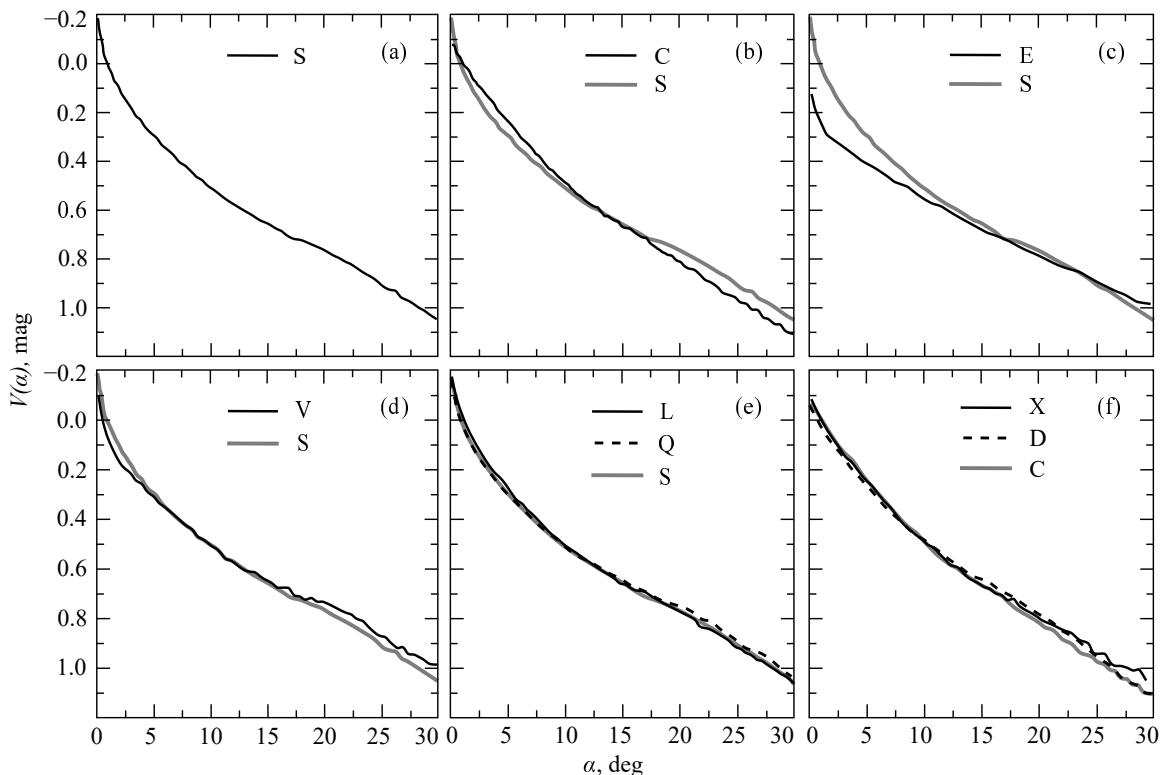


Рис. 2. Усредненные фазовые кривые блеска для астероидов разных таксономических типов.

Также были рассмотрены другие таксономические типы астероидов. Некоторые из них, такие как V, Q, L, D, X, включают достаточное количество астероидов для построения усредненной фазовой кривой, но, как выяснилось, их графики практически не отличаются от уже известных, полученных для С- и S-типов.

### 3.4. V-тип

К этому типу принадлежат в настоящее время 2900 астероидов. Построенная на рис. 2d фазовая зависимость очень близка к фазовой зависимости S-астероидов. Оппозиционный эффект, возможно, выражен сильнее.

### 3.5. Q- и L-типы

Существует достаточно много астероидов этих двух типов: около 10 000 типа L и более 3600 типа Q. Полученные усредненные фазовые кривые, приведенные на рис. 2e, почти не отличаются от фазовой кривой для S-астероидов. Все три графика практически сливаются в одну линию.

### 3.6. D- и X-типы

Найдено 3300 астероидов типа D. Из списка астероидов типа X были исключены все объекты,

входящие в семейство Венгрии; в результате было использовано около 4800 X-астероидов. Полученные для этих типов усредненные фазовые кривые приведены на рис. 2f. Их графики практически совпадают с графиком для С-астероидов.

## 4. ПРИВЕДЕНИЕ ФАЗОВЫХ КРИВЫХ К ОБЩЕМУ НАЧАЛУ

Для более подробного рассмотрения поведения усредненных фазовых кривых блеска вблизи оппозиции три наиболее различающихся графика, построенные для S-, C-, E-астероидов, были помещены на один рисунок. На рис. 3 крупным планом приведены отрезки полученных фазовых кривых для углов  $\alpha < 5^\circ$ .

Рисунок позволяет определить точки пересечения графиков с осью ординат, то есть их смещение относительно нулевого значения в точке оппозиции. Этот сдвиг представляет собой среднее значение разности  $H - H_{\text{МРС}}$  и равен  $-0^m 2$  для типа S,  $-0^m 1$  для типа C,  $+0^m 1$  для типа E.

Такие значения дают возможность свести все три графика к одному началу, что помогает наглядно оценить различия в их форме и в величине оппозиционного эффекта. Усредненные фазовые кривые, приведенные к общему началу, показаны на рис. 4. Хорошо видно, как различаются

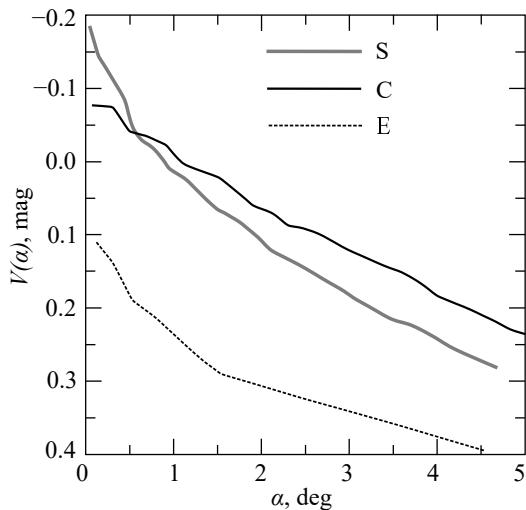


Рис. 3. Поведение усредненных фазовых кривых блеска для астероидов таксономических типов S, C, E вблизи оппозиции.

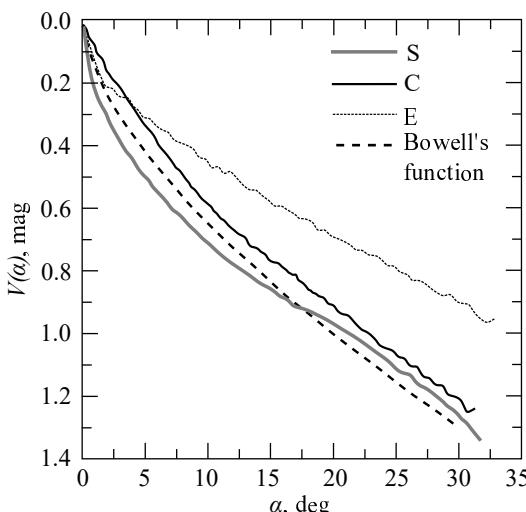


Рис. 4. Усредненные фазовые кривые для S-, C- и E-астероидов, приведенные к общему началу. Для сравнения приведен график функции Боуэлла для  $G = 0.15$ .

оппозиционный эффект и наклон линейной части графиков.

Для сравнения приведен график функции Боуэлла (Bowell et al., 1989) для  $G = 0.15$ . Можно видеть, что график усредненной фазовой кривой для E-астероидов не соответствует этой функции. Кроме того, график для E-астероидов пересекает аналогичный график для C-астероидов. Как известно, функция Боуэлла представляет собой семейство непересекающихся кривых. Следовательно, она не сможет хорошо аппроксимировать фазовые кривые для астероидов разных таксономических типов.

## 5. УСРЕДНЕННЫЕ ФАЗОВЫЕ КРИВЫЕ ДЛЯ КРУПНЫХ И МЕЛКИХ АСТЕРОИДОВ

Как выяснилось в процессе работы, смещение фазовых кривых наблюдается не для всех астероидов. Это можно обнаружить, сравнивая фазовые кривые для S-астероидов на рис. 1 и рис. 2а. Первая из них построена только для крупных астероидов с  $H < 11^m$  и не показывает смещения, в то время как вторая — для всех известных астероидов — заметно смещена относительно нулевого значения. Очевидно, смещение связано с размером астероидов.

Для более детального рассмотрения этого вопроса среди астероидов C-, S- и E-типов были отобраны наиболее крупные и наиболее мелкие. Разделение проводилось по абсолютной звездной величине. При этом учитывалось, что количество астероидов в каждой выборке не должно быть слишком малым, во избежание недостаточного для построения относительно гладкой фазовой кривой объема наблюдательных данных.

Здесь для разных таксономических типов понятие «крупный астероид» относительно. Так, семейство Венгрии, используемое в качестве источника E-астероидов, состоит из довольно мелких объектов. Поэтому крупными считались астероиды с диаметрами 1–2 км ( $H < 15^m$ ), тогда как для других типов они, безусловно, являются мелкими. В качестве крупных тел C-типа были отобраны реально большие астероиды с диаметрами более 50 км ( $H < 9^m$ ), а для типа S к крупным были отнесены астероиды диаметром более 19 км ( $H < 11^m$ ).

В результате для крупных и мелких астероидов трех таксономических типов были построены усредненные фазовые кривые (рис. 5). Сравнение полученных графиков, действительно, показало зависимость смещения от размера астероидов. При этом форма кривых для каждого типа более или менее сохраняется.

Для крупных астероидов C- и S-типов фазовую кривую можно считать несмещенной, в то время как для мелких астероидов она смещается вверх. Таким образом, можно заключить, что для мелких астероидов этих типов  $H_{MPC}$  в среднем завышена — в действительности они ярче.

Взаимное положение фазовых кривых, построенных для крупных и мелких астероидов трех разных типов, кажется одинаковым, но это согласие только видимое. Выводы, касающиеся таксономического типа E, должны быть иными. Действительно, можно заметить что фазовая кривая, построенная для более крупных E-астероидов, смещена от нуля больше, чем аналогичная кривая, построенная для мелких астероидов, что не соответствует результатам, полученным для C- и S-типов.

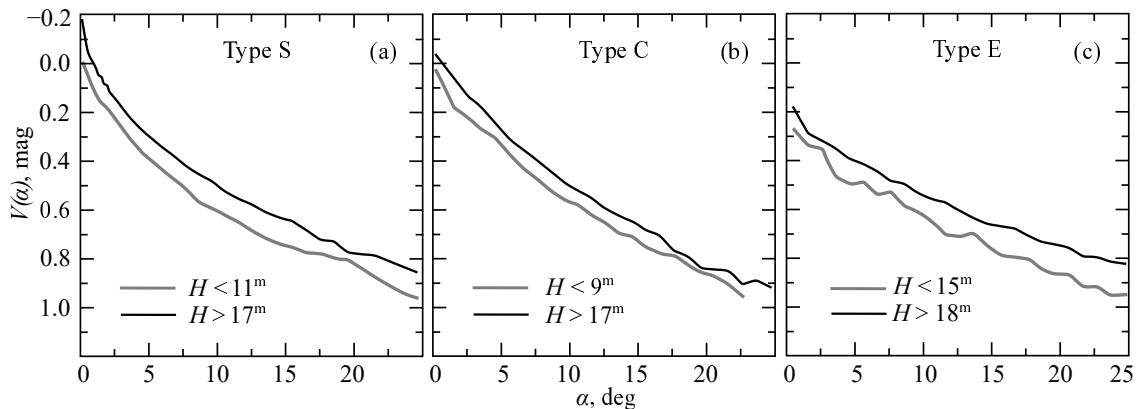


Рис. 5. Усредненные фазовые кривые для более крупных и мелких астероидов разных таксономических типов. Деление по размеру в рамках работы условно, подробнее см. в тексте.

Заметно более низкая величина  $H_{MPC}$  для существующих астероидов Е-типа указывает на то, что на самом деле эти астероиды не такие яркие. С помощью известной формулы (Gehrels, 1974)

$$\log D = 3.122 - 0.5 \log p_v - 0.2H,$$

где  $D$  — диаметр астероида в километрах,  $H$  — абсолютная звездная величина, а  $p_v$  — геометрическое альбедо в видимых лучах, можно приблизительно вычислить, насколько значение альбедо, равное 1.0, уменьшится при увеличении  $H$ . Для астероидов Е-типа с  $H < 15^m$  смещение  $H - H_{MPC} = 0^m3$ . Тогда при увеличении  $H$  на  $0^m3$  альбедо астероида с диаметром 0.8 км уменьшится с 1 до более правдоподобной величины 0.65.

## 6. СРАВНЕНИЕ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ДРУГИХ АВТОРОВ

В работах нескольких авторов (Jurić et al., 2002; Pravec et al., 2012; Vereš et al., 2015), обращалось внимание на сдвиг публикуемых в ЦМП абсолютных звездных величин относительно собственных результатов, которые при этом довольно хорошо согласуются между собой. Было установлено, что разность  $H - H_{MPC}$  между вычисленными значениями абсолютной звездной величины и взятыми из каталога ЦМП в среднем положительна. Наряду с этим отмечалась зависимость найденного смещения от  $H$ . Максимум смещения, равный  $+0^m5$ , наблюдался для  $H = 14^m$  (Pravec et al., 2012).

Усредненные фазовые кривые в настоящей работе позволили получить близкий результат, касающийся величины максимального сдвига в абсолютной звездной величине, только для астероидов типа Е. Для астероидов с  $H < 15^m$ , принадлежащих к этому таксономическому типу, средняя разность  $H - H_{MPC}$  составила  $0^m3$ . Для всех остальных рассмотренных таксономических типов результат оказался противоположным: значение средней разности  $H - H_{MPC}$  отрицательно.

Возможной причиной такого расхождения может быть различие в методах исследования и данных, лежащих в его основе. Авторы упомянутых работ использовали наблюдения астероидов, выполненные в рамках отдельных наблюдательных программ, тогда как нами для построения усредненных фазовых кривых привлечены все наблюдения из каталога ЦМП, проведенные в разных обсерваториях.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты построения усредненных суммарных фазовых кривых для разных таксономических типов астероидов и их сравнения. Наиболее детально проанализированы фазовые кривые астероидов С-, С- и Е-типа. Форма фазовых кривых для указанных типов различна и соответствует результатам для отдельных астероидов того же таксономического типа, полученным другими авторами с использованием общепринятых методов (Belskaya and Shevchenko, 2000; Shevchenko et al., 2019).

Рассмотрены также несколько других таксономических типов. Полученные фазовые кривые для астероидов Q- и L-типов почти не отличаются от аналогичной кривой для S-типа, а кривая для V-типа очень близка к ней. Фазовые кривые для астероидов типов D и X практически совпадают с кривой для С-типа. Построенные фазовые кривые хорошо демонстрируют характер оппозиционного эффекта, свойственного разным таксономическим типам.

В точке оппозиции при  $\alpha = 0^\circ$  все фазовые кривые смещены относительно нулевого значения. Смещение указывает на то, что абсолютная звездная величина  $H_{MPC}$ , публикуемая в ЦМП, определена для астероидов данного типа в среднем с систематической ошибкой, равной наблюдаемому смещению:  $-0^m2$  для типа S,  $-0^m1$  для типа С и  $+0^m1$  для типа Е. Учет смещения  $H$  для

Е-астероидов ведет к уменьшению их чрезвычайно высокого альбедо.

Также установлено, что величина смещения зависит от размера астероидов. Смещение практически отсутствует у фазовых кривых, построенных для крупных астероидов с  $H < 9^m$  для С-типа и  $H < 11^m$  для S-типа.

Согласие с результатами других авторов (Jurić et al., 2002; Pravec et al., 2012; Vereš et al., 2015) наблюдается только для таксономического типа Е, для которого разность  $H - H_{MPC}$  в среднем положительна. Для всех остальных рассмотренных таксономических типов эта разность отрицательна.

Причиной данного несоответствия может быть привлечение для построения усредненных фазовых кривых в настоящей работе разнородного массива наблюдений астероидов в разных обсерваториях, тогда как в работах других авторов использовались наблюдения, выполненные в рамках отдельных наблюдательных программ. В любом случае этот вопрос требует дальнейшего исследования.

## БЛАГОДАРНОСТИ

В работе использованы данные Центра малых планет Международного астрономического союза: <https://minorplanetcenter.net/>.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа финансировалась за счет средств бюджета института. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет, что у нее нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. I. N. Belskaya and V. G. Shevchenko, *Icarus* **147** (1), 94 (2000). DOI:10.1006/icar.2000.6410
2. E. Bowell, B. Hapke, D. Domingue, et al., in *Proc. Conf. on Asteroids II, Tucson, AZ, USA, 1988*, Ed. by R. P. Binzel, T. Gehrels, and M. S. Matthews (Tucson, AZ, University of Arizona Press, 1989), pp. 524–556.

3. S. J. B. Bus, PhD Thesis (Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1999).
4. T. Gehrels, *Astrophys. J.* **123**, 331 (1956). DOI:10.1086/146166
5. T. Gehrels, *Planets and Satellites* (Mir, Moscow, 1974).
6. P. H. Hasselmann, J. M. Carvano, and D. Lazzaro, SDSS-based Asteroid Taxonomy V1.0, NASA Planetary Data System, id. EAR-A-I0035-5-SDSSTAX-V1.0 (2011).
7. M. Jurić, Ž. Ivezić, R. H. Lupton, et al., *Astron. J.* **124** (3), 1776 (2002). DOI:10.1086/341950
8. M. Mahlke, B. Carry, and L. Denneau, *Icarus* **354**, article id. 114094 (2021). DOI:10.1016/j.icarus.2020.114094
9. J. Martikainen, K. Muinonen, A. Penttilä, et al., *Astron. and Astrophys.* **649**, id. A98 (2021). DOI:10.1051/0004-6361/202039796
10. K. Muinonen, I. N. Belskaya, A. Cellino, et al., *Icarus* **209** (2), 542 (2010). DOI:10.1016/j.icarus.2010.04.003
11. C. Neese, Asteroid Taxonomy V6.0, NASA Planetary Data System, id. EAR-A-5-DDR-TAXONOMY-V6.0 (2010).
12. P. Pravec, A. W. Harris, P. Kušnirák, et al., *Icarus* **221** (1), 365 (2012). DOI:10.1016/j.icarus.2012.07.026
13. V. G. Shevchenko, I. N. Belskaya, O. I. Mikhalkenko, et al., *Astron. and Astrophys.* **626**, id. A87 (2019). DOI:10.1051/0004-6361/201935588
14. D. J. Tholen and M. A. Barucci, in *Proc. Conf. on Asteroids II, Tucson, AZ, USA, 1988*, Ed. by R. P. Binzel, T. Gehrels, and M. S. Matthews (University of Arizona Press, Tucson, 1989), pp. 298–315 (1989).
15. P. Vereš, R. Jedicke, A. Fitzsimmons, et al., *Icarus* **261**, 34 (2015). DOI:10.1016/j.icarus.2015.08.007
16. T. A. Vinogradova, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **484** (3), 3755 (2019). DOI:10.1093/mnras/stz228
17. T. A. Vinogradova, *Transactions of IAA RAS* **54**, 3 (2020).

**Averaged Phase Curves for Several Taxonomic Types of Asteroids****Т. А. Vinogradova<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Institute of Applied Astronomy, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 191187 Russia

A method is proposed for constructing averaged phase curves of asteroid brightness for various taxonomic types. The method is based on a large number of astrometric observations published in the Minor Planet Center catalog, for which the apparent visual magnitudes of asteroids were measured simultaneously. Thousands of asteroids of each taxonomic type S, C, E, V, Q, L, D, and X were selected, and numerical integration of the equations of motion was performed. In the course of integration, for each observation, the component of the apparent magnitude dependent on the phase angle was determined. For asteroids of a given type, all obtained values were averaged over the phase angle. As a result, averaged phase curves characterizing each taxonomic type were constructed. The large volume of observational data makes it possible to clearly reveal the character of the opposition effect for different types. A shift of the phase curves with respect to zero at a zero phase angle was noted. This shift depends on asteroid size and differs among taxonomic types. The presence of such a shift indicates a systematic error in the absolute magnitudes of asteroids published in the Minor Planet Center catalog.

Keywords: *minor planets, asteroids: general—methods: numerical—techniques: photometric*