

УДК 523.44:520.82/85

## НАБЛЮДЕНИЯ СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ АСТЕРОИДОВ В ПОЛЯРИЗОВАННОМ СВЕТЕ

© 2018 В. Л. Афанасьев<sup>1</sup>, А. В. Ипатов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия<sup>1</sup>

<sup>2</sup>Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, 191187 Россия

Поступила в редакцию 1 декабря 2017 года; принята в печать 22 марта 2018 года

Приведены результаты позиционных, фотометрических и поляризационных наблюдений на 6-м телескопе БТА САО РАН двух астероидов, сближающихся с Землей. Измерение вариаций блеска астероида 2009 DL46 8 марта 2016 г. (примерно 20 зв. вел. на расстоянии около 0.23 а.е. от Земли) в течение 1.2 часа показало вспышку с амплитудой  $0^m.2$  длительностью около 20 минут. Степень поляризации в это же время возросла со среднего значения 2–3% до 14%. При этом угол плоскости поляризации составил  $113^\circ \pm 1^\circ$  при фазовом угле  $43^\circ$ . Полученный результат указывает на то, что поверхность вращающего (период около 2.5 часов) астероида имеет, вероятно, неравномерную шероховатость. Наблюдения другого астероида — 1994 UG, яркость которого была около  $17^m$ , а расстояние до Земли составляло 0.077 а.е., проводились в ночь 6/7 марта 2016 г. в двух режимах: фотометрическом и спектрополяриметрическом. Согласно результатам фотометрии в трех фильтрах *B, V, R* системы Джонсона, в течении часа блеск астероида в пределах ошибок измерений (около  $0^m.02$ ) не менялся. Спектрополяриметрия в диапазоне 420–800 нм показала величину степени поляризации, спадающую от 8% в синей области спектра до 2% в красной, при величине фазового угла около  $44^\circ$ , что типично для астероидов, сближающихся с Землей и имеющих таксономический класс S.

Ключевые слова: *малые планеты, астероиды: индивидуальные: DL46, 1994 UG —методики: поляриметрические*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование динамических и физических характеристик астероидов, сближающихся с Землей, позволяет не только изучать их природу, но и оценивать степень опасности столкновения с Землей. Если радиолокационные наблюдения дают возможность получать изображения и изучать поступательно-вращательные движения этих небесных тел с точностью, недостижимой оптическими методами, то по наблюдениям в оптическом диапазоне возможно исследование их физических и минералогических характеристик.

Первоочередной задачей при оптических наблюдениях астероидов является измерение их альбедо, которое определяется как шероховатостью их поверхности, так и составом вещества астероида. Традиционные методы фотометрии и спектроскопии ориентированы на поиски отличий в спектре астероида от солнечного спектра, которые весьма малы (1–2%) [1]. Более перспективным представляется применение поляризационных методов,

позволяющих в видимом диапазоне определить физические характеристики астероидов. Поляриметрические наблюдения астероидов дают информацию о геометрическом альбедо астероидов и могут быть источником косвенных сведений о типичных размерах частиц поверхностного реголита. На роль поляриметрии как мощного инструмента (наряду со спектрофотометрией) обращено внимание в работах [2–5]. Однократного поляриметрического наблюдения астероида недостаточно для определения его свойств, потому что характер поляризации зависит от фазового угла. Для большинства наблюдаемых астероидов сделаны разовые измерения, и информация о поляризации астероидов в широком интервале фазовых углов имеется лишь для очень незначительной доли из общего числа астероидов [6].

Сближающиеся с Землей астероиды (СЗА) по известным причинам вызывают особый интерес. Их можно наблюдать при больших фазовых углах, где поляризация определяется рассеянием на отдельных частицах и величиной альбедо поверхности. Поляриметрические наблюдения при фазовых углах выше  $90^\circ$  были проведены до сих пор

<sup>1</sup>E-mail: vafan@sao.ru

только для трех СЗА: (1685) Торо [7], (4179) Тутатис [8] и (23187) 2000 PN<sub>9</sub> [9]. Эти астероиды относятся к таксономическому классу S и имеют довольно похожие поляризационные свойства:  $P_{\max} = 7.7\text{--}8.5\%$  и  $\alpha_{\max} = 103^\circ\text{--}110^\circ$ . Максимум поляризации наблюдался также у астероида E-типа 33342 (1998 WT24) [10]. Имеющиеся данные, полученные до сих пор для СЗА, хотя все еще количественно ограничены, показывают, что даже по одиночным измерениям поляризации можно различить астероиды с низкими, умеренными и высокими альбедами. Крайне важным представляется исследование вариаций блеска и сравнение их с радиоданными. В конечном итоге целью исследования СЗА является как определение их динамических параметров, так и свойств поверхности.

В настоящей работе мы приводим результаты поляриметрических и фотометрических наблюдений на 6-м телескопе двух слабых астероидов, сближающихся с Землей.

## 2. НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения проводились при помощи универсального спектрографа SCORPIO-2 [11], установленного в первичном фокусе 6-метрового телескопа БТА САО РАН. Были использованы следующие режимы работы спектрографа:

- прямые изображения в трех фильтрах *BVR* системы Джонсона;
- поляриметрия в фильтре *V* с использованием дихроичного поляроида;
- спектрополяриметрия в области 0.4–0.9 мкм с низким спектральным разрешением ( $R \sim 500$ ).

В качестве светоприемника нами использовалась ПЗС матрица EEV 42-90 формата 4096 × 2048 элементов. Масштаб изображения в плоскости приемника — 0''357 px при размере пиксела 27 мкм (binning=2).

В начале 2016 г., когда планировались пробные наблюдения на БТА, нам были доступны два астероида — DL46 и 1994 UG. Наблюдения проводились в марте в ночи резерва директора. Далее мы приводим результаты наблюдений обоих астероидов.

### 2.1. Наблюдения астероида DL46

Согласно эфемериде, астероид DL46 был весьма слабым (около 20 зв. вел.) и находился на расстоянии 0.23 а.е. от Земли. Условия видимости (Луна) позволили наблюдать его только вечером 8 марта 2016 г. Из-за слабости объекта была проведена только поляриметрия в фильтре *V* с

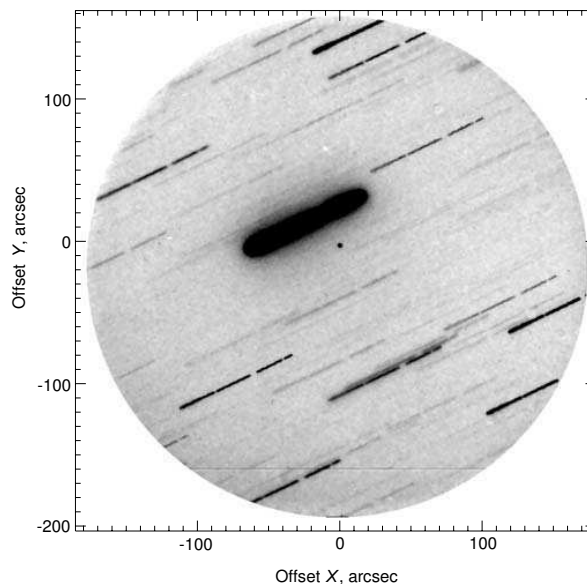


Рис. 1. Суммарное изображение астероида в фильтре *V* (полное время экспозиции 3600 с).

вращающимся поляроидом по методу Фесенкова. В таблице 1 приведен журнал наблюдений, где указаны: имя FITS-файла изображения, всемирное время середины экспозиции, угол поворота поляроида, качество изображения в секундах дуги, зенитное расстояние, измеренные экваториальные координаты астероида на момент середины экспозиции и ошибки их измерения. Длительность экспозиции для всех изображений была одинаковой и составляла 100 с. Гидирование осуществлялось по методу Меткоффа при помощи лунно-планетного привода АСУ БТА. На рис. 1 показан суммарный снимок, иллюстрирующий качество гидирования астероида. Для фотометрической калибровки нами была получена серия снимков рассеянного скопления NGC 2420. Данные обрабатывались стандартными процедурами DAOPHOT.

#### 2.1.1. Позиционные измерения

Для каждого изображения нами проводилась астрометрия с использованием каталога USNO-2.0 в формате Guide Star Catalog [12] и в заголовке каждого FITS-файла записывалась стандартная нелинейная астрометрическая структура. Средняя точность астрометрической привязки одиночного кадра — около 0''3. Результаты позиционных измерений астероида DL46 приведены в столбцах (7) и (8) таблицы 1 и там же (столбцы (9) и (10)) указаны ошибки астрометрической привязки.

#### 2.1.2. Поляриметрия

Методика редукиции поляриметрических данных при наблюдениях с поляроидом достаточно подробно описана в нашей работе [13]. Наиболее

Таблица 1. Поляриметрические наблюдения астероида DL46 8 марта 2016 г.

File	UT hh mm ss.ss	Angle, deg	Seeing, arcsec	<i>z</i> , deg	RA(2000), hh mm ss.ss	Dec(2000), dd mm ss.ss	Err RA, arcsec	Err Dec, arcsec
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
s13880203	16 36 21.75	-60	1.0	39	10 30 39.953	+56 40 34.19	0.21	0.10
s13880204	16 38 18.06	0	1.0	39	10 30 39.780	+56 40 36.41	0.18	0.37
s13880205	16 40 13.37	+60	0.8	38	10 30 39.699	+56 40 38.11	0.13	0.23
s13880206	16 43 12.94	-60	0.8	38	10 30 39.453	+56 40 41.84	0.16	0.36
s13880207	16 45 09.25	0	0.8	38	10 30 39.341	+56 40 42.95	0.14	0.27
s13880208	16 47 03.56	+60	0.8	38	10 30 39.220	+56 40 45.56	0.17	0.46
s13880209	16 49 06.88	-60	0.8	37	10 30 39.084	+56 40 47.80	0.19	0.28
s13880210	16 51 03.29	0	0.8	37	10 30 38.960	+56 40 49.42	0.22	0.26
s13880211	16 52 59.59	+60	0.8	37	10 30 38.796	+56 40 51.05	0.16	0.15
s13880212	16 55 01.00	-60	0.8	36	10 30 38.737	+56 40 53.01	0.29	0.24
s13880213	16 56 55.30	0	0.8	36	10 30 38.584	+56 40 55.11	0.25	0.26
s13880214	16 58 51.40	+60	0.8	36	10 30 38.522	+56 40 56.90	0.22	0.18
s13880215	17 04 50.92	-60	0.8	35	10 30 38.103	+56 41 03.58	0.22	0.21
s13880216	17 06 47.13	0	0.8	35	10 30 38.033	+56 41 04.81	0.28	0.35
s13880217	17 08 41.43	+60	0.8	35	10 30 37.845	+56 41 07.17	0.18	0.39
s13880218	17 10 44.84	-60	0.8	34	10 30 37.683	+56 41 08.60	0.24	0.21
s13880219	17 12 40.14	0	0.8	34	10 30 37.546	+56 41 11.30	0.26	0.40
s13880220	17 14 36.54	+60	0.8	34	10 30 37.445	+56 41 12.94	0.22	0.32
s13880221	17 16 39.96	-60	0.8	33	10 30 37.384	+56 41 15.07	0.16	0.24
s13880222	17 18 34.26	0	0.8	33	10 30 37.191	+56 41 17.53	0.29	0.38
s13880223	17 20 29.57	+60	0.8	33	10 30 37.129	+56 41 18.74	0.27	0.23
s13880224	17 22 31.88	-60	0.8	33	10 30 36.961	+56 41 21.27	0.18	0.19
s13880225	17 24 29.18	0	0.8	32	10 30 36.829	+56 41 23.21	0.25	0.22
s13880226	17 26 23.59	+60	0.8	32	10 30 36.699	+56 41 25.28	0.27	0.21
s13880227	17 29 34.16	-60	0.8	32	10 30 36.456	+56 41 28.87	0.24	0.24
s13880228	17 31 28.36	0	0.8	31	10 30 36.372	+56 41 30.33	0.20	0.26
s13880229	17 33 22.56	+60	0.8	31	10 30 36.264	+56 41 32.67	0.20	0.24
s13880230	17 35 24.77	-60	0.8	31	10 30 36.126	+56 41 34.30	0.22	0.29
s13880231	17 37 43.09	0	0.8	31	10 30 35.979	+56 41 36.82	0.25	0.27
s13880232	17 39 38.50	+60	0.8	30	10 30 35.823	+56 41 38.39	0.20	0.27
s13880233	17 41 39.91	-60	0.8	30	10 30 35.684	+56 41 41.15	0.25	0.29
s13880234	17 43 36.22	0	1.1	30	10 30 35.568	+56 41 42.65	0.28	0.29
s13880235	17 45 31.53	+60	1.1	29	10 30 35.495	+56 41 45.06	0.21	0.18
s13880236	17 47 32.85	-60	1.1	29	10 30 35.305	+56 41 46.59	0.23	0.29
s13880237	17 49 29.16	0	1.1	29	10 30 35.144	+56 41 49.03	0.29	0.19
s13880238	17 51 24.37	+60	1.1	29	10 30 35.052	+56 41 50.87	0.21	0.23

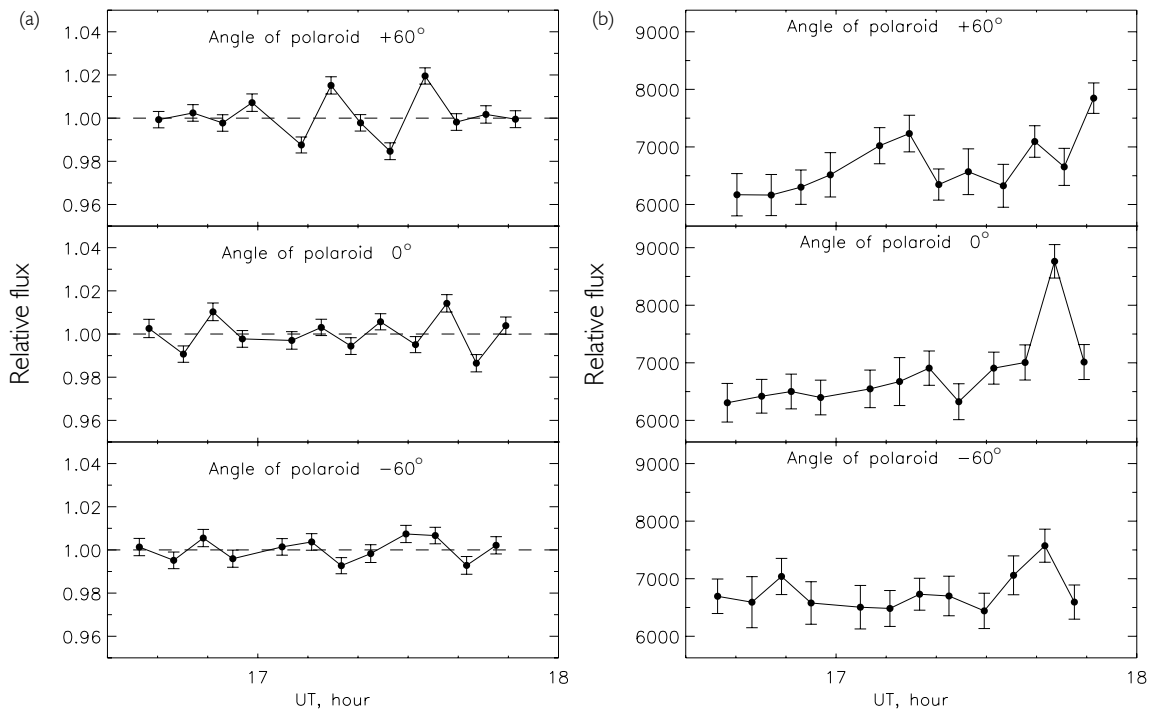


Рис. 2. Вариации потока опорной звезды (а) и астероида DL46 (б) в различных поляризационных каналах.

критичным при измерении поляризации по методу Фесенкова является стабильность атмосферы. На рис. 2а показаны вариации яркости опорной звезды с нулевой поляризацией в поле DL46 для трех углов поворота поляроида и соответствующие вариации потока для исследуемого объекта (рис. 2б). Можно сделать вывод, что вариации потока от DL46 в различных поляризационных каналах за время наблюдений (1 час) достигают 40–50%, что заметно превышает как атмосферные вариации (1.5%), так и случайные ошибки измерений (4%), которые определяются статистикой фотототчетов.

Имея из наблюдений измеренные интенсивности в трех углах поляроида —  $I(x, y)_0$ ,  $I(x, y)_{-60}$  и  $I(x, y)_{+60}$ , мы можем вычислить с точностью до преобразования поворота параметры Стокса  $Q$  и  $U$  в каждой точке изображения с координатами  $(x, y)$ . Используем следующие соотношения:

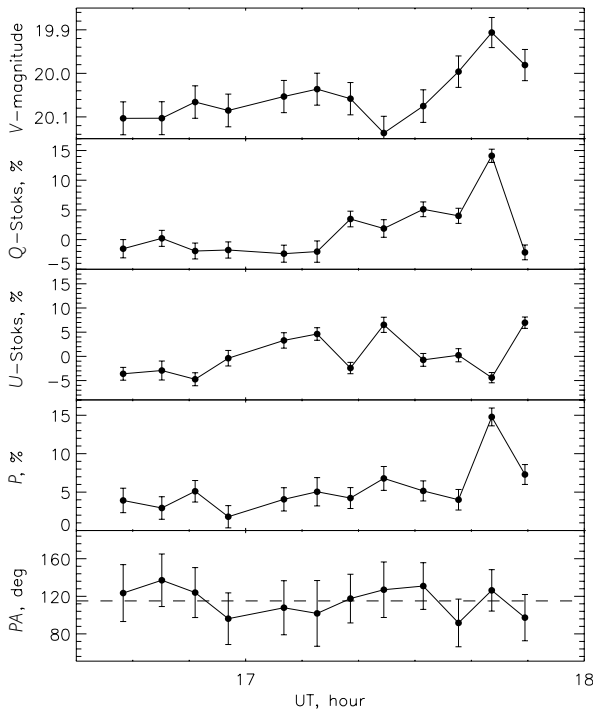
$$Q(x, y) = \frac{2I(x, y)_0 - I(x, y)_{-60} - I(x, y)_{+60}}{I(x, y)_0 + I(x, y)_{-60} + I(x, y)_{+60}}$$

$$U(x, y) = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{I(x, y)_{+60} - I(x, y)_{-60}}{I(x, y)_0 + I(x, y)_{-60} + I(x, y)_{+60}}. \quad (1)$$

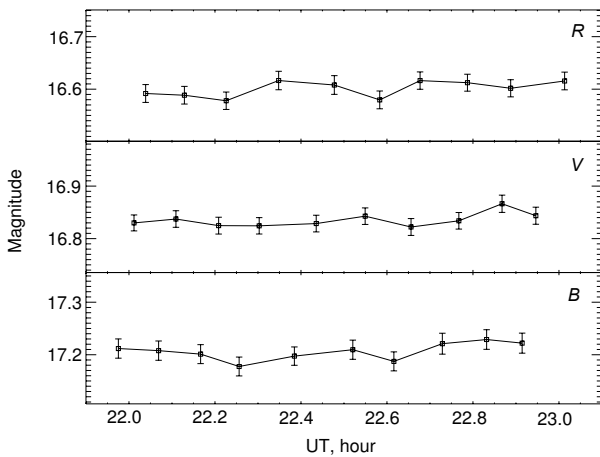
Отсюда по известной формуле

$$P = \sqrt{Q^2 + U^2}, \quad PA = PA_{\text{slit}} - \frac{1}{2} \arctan \frac{U}{Q} + PA_0 \quad (2)$$

вычисляем значение степени линейной поляризации  $P$  и позиционного угла плоскости поляризации  $PA$ . Здесь  $PA_{\text{slit}}$  и  $PA_0$  — постоянные прибора. На рис. 3 показано наблюдаемое изменение со временем параметров линейной поляризации астероида DL46: интегральной яркости (параметр Стокса  $I$ ) в звездных величинах, нормированные параметры Стокса  $Q$  и  $U$ , степень линейной поляризации  $P$  и позиционный угол плоскости поляризации  $PA$ . На рисунке видно, что блеск астероида изменялся мало, лишь в последних трех точках нашей серии в течении 20 минут наблюдалось значимое увеличение яркости на 0.2 зв. вел., что почти на порядок превышает вариации прозрачности атмосферы (см. рис. 2). Однако более удивительным является то, что в это же время степень линейной поляризации возросла со среднего значения 2–3%. Угол плоскости поляризации при этом оставался неизменным и с точностью до ошибок совпадал с фазовым углом астероида, согласно эфемериде (порядка  $42^\circ$ ). Вероятно, резкое увеличение поляризации связано с неоднородностью поверхности астероида, например, наличием более гладких участков на поверхности типа базальтовых плит.



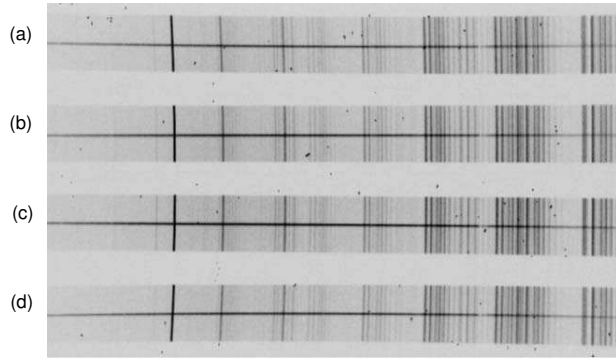
**Рис. 3.** Изменение параметров поляризации астероида DL46.



**Рис. 4.** Вариации блеска астероида 1994 UG в различных фильтрах.

### 2.2. Наблюдения астероида 1994 UG

Согласно эфемериде, в ночь наблюдений 6 марта 2016 г. астероид 1994 UG был достаточно ярким (примерно 17 зв. вел.) и находился на расстоянии 0.077 а.е. от Земли. Наряду с измерением его блеска и положения в различных фильтрах мы смогли изучить его спектр в поляризованном свете. Результаты позиционных и фотометрических наблюдений астероида 1994 UG приведены в таблице 2, где указаны: номер файла, всемирное время середины экспозиции, экспозиция, фильтр,



**Рис. 5.** Спектры астероида 1994 UG без вычитания фона неба, полученные с двойным анализатором Волластона с экспозицией 180 с 6 марта 2016 г. (UT 23:39). Значения углов выделяемой плоскости поляризации на спектрах — 0° (a), 90° (b), 45° (c) и 135° (d).

зенитное расстояние, качество изображений, измеренные координаты объекта, ошибка астрометрической привязки и звездная величина.

#### 2.2.1. Астрометрия и фотометрия

Астрометрическая привязка делалась таким же образом, как и для астероида DL46.

Фотометрические измерения проводились в трех цветовых полосах системы Джонсона: *B*, *V* и *R* ( $\lambda_{\text{eff}} \sim 435$  нм, 555 нм и 700 нм соответственно). Прозрачность атмосферы была достаточно хорошей. Длительность экспозиции в каждом фильтре выбиралась из соображений равноточных измерений во всех фильтрах. Всего было получено десять серий по три последовательные экспозиции в каждом фильтре. Одной из трудностей при проведении фотометрии было то, что более чем в половине полученных кадров на изображения астероида накладывались изображения слабых звезд, что затрудняло измерение фона неба для последующего вычитания и вносило систематические ошибки в фотометрические оценки. В некоторых случаях ошибка достигала 0.2–0.3 зв. вел. Для корректного разделения изображений использовались методы апертурной фотометрии, которые уменьшили систематические ошибки до нескольких сотых звездной величины. Измерения звездных величин в трех фильтрах для каждого момента наблюдений приведены в таблице 2. Изменения яркости астероида со временем показаны на рис. 4.

На рисунке видно, что значимые изменения блеска и показатели цвета, превышающие вариации прозрачности атмосферы во время наблюдений (3%, или 0.03 зв. вел.), нами не обнаружены.

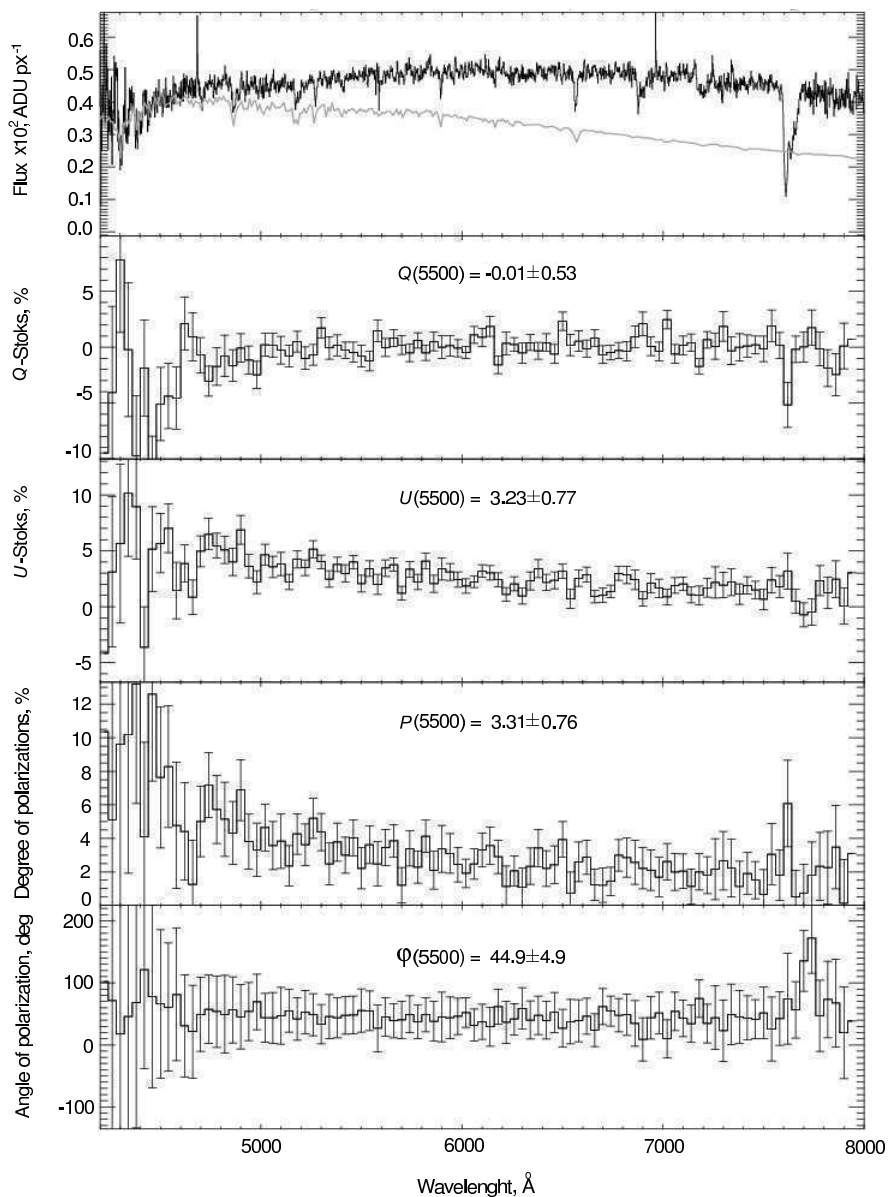


Рис. 6. Параметры поляризации в спектре астероида 1994 UG.

### 2.2.2. Спектрополяриметрия

Спектрополяриметрия астероида 1994 UG проводилась на БТА на спектрографе SCORPIO-2 с двойным анализатором Волластона, позволяющим получать одновременно четыре спектра в разных плоскостях колебаний электрического вектора исследуемого электромагнитного излучения в видимой области спектра —  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $135^\circ$ . Высота щели спектрографа при этом была  $1'$ , что позволило уверенно вычитать фон ночного неба. Всего было получено пять спектров с экспозициями 180 с с объемной фазовой голографической решеткой 940 штр./мм в диапазоне 420–850 нм. Ширина

щели была равна  $2''$ , а качество изображения —  $1''5$ . Спектральное разрешение при этих условиях составило  $R \sim 450$ . Пример спектра, полученного в спектрополяриметрическом режиме, показан на рис. 5.

Параметры Стокса для линейно поляризованного излучения в этом случае можно найти из соотношений:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) + I_{90}(\lambda)K_Q(\lambda) + I_{45}(\lambda) + I_{135}(\lambda)K_U(\lambda), \quad (3)$$

$$Q(\lambda) = \frac{I_0(\lambda) - I_{90}(\lambda)K_Q(\lambda)}{I_0(\lambda) + I_{90}(\lambda)K_Q(\lambda)}, \quad (4)$$

Таблица 2. Результаты позиционных и фотометрических измерений астероида 1994 UG 7 марта 2016 г.

File	UT, hh mm ss.ss	$T_{\text{exp}}$ , s	Filter	$z$ , deg	Seeing, arcsec	RA(2000), hh mm ss.ss	Dec(2000), dd mm ss.ss	Error, arcsec	Magnitude
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
s13860101	21:58:31.04	120	B	22	2.0	09 37 44.841	+48 43 06.97	0.17	17.21 ± 0.02
s13860102	22:00:42.07	60	V	22	2.0	09 37 44.117	+48 43 10.31	0.18	16.83 ± 0.02
s13860103	22:02:19.65	30	R	22	2.0	09 37 43.581	+48 43 13.75	0.22	16.59 ± 0.02
s13860104	22:04:08.01	120	B	22	2.0	09 37 42.929	+48 43 17.71	0.25	17.21 ± 0.02
s13860105	22:06:33.26	60	V	23	2.0	09 37 42.066	+48 43 21.68	0.26	16.84 ± 0.02
s13860106	22:07:44.00	30	R	23	2.0	09 37 41.687	+48 43 24.16	0.14	16.59 ± 0.02
s13860107	22:10:59.79	120	B	23	2.0	09 37 40.880	+48 43 28.42	0.27	17.20 ± 0.02
s13860108	22:12:30.51	60	V	24	2.0	09 37 39.996	+48 43 33.77	0.19	16.83 ± 0.02
s13860109	22:13:34.01	30	R	24	2.0	09 37 39.644	+48 43 35.80	0.14	16.58 ± 0.02
s13860110	22:15:22.21	120	B	24	2.0	09 37 38.964	+48 43 39.70	0.25	17.18 ± 0.02
s13860111	22:18:10.04	60	V	25	2.0	09 37 38.058	+48 43 44.66	0.14	16.82 ± 0.02
s13860112	22:20:53.01	30	R	25	2.0	09 37 37.076	+48 43 50.01	0.12	16.62 ± 0.02
s13860113	22:21:04.96	120	B	26	2.0	09 37 36.322	+48 43 54.41	0.20	17.19 ± 0.02
s13860114	22:26:07.70	60	V	26	2.0	09 37 35.270	+48 44 00.58	0.15	16.83 ± 0.02
s13860115	22:28:39.51	30	R	27	2.0	09 37 34.384	+48 44 05.37	0.13	16.61 ± 0.02
s13860116	22:31:14.09	120	B	27	2.0	09 37 33.519	+48 44 10.82	0.23	17.21 ± 0.02
s13860117	22:32:57.34	60	V	27	2.0	09 37 32.905	+48 44 13.98	0.21	16.84 ± 0.02
s13860118	22:34:59.67	30	R	28	2.0	09 37 32.176	+48 44 17.92	0.10	16.58 ± 0.02
s13860119	22:36:57.95	120	B	28	2.0	09 37 31.441	+48 44 22.23	0.26	17.19 ± 0.02
s13860120	22:39:11.78	60	V	28	2.0	09 37 30.661	+48 44 26.27	0.17	16.82 ± 0.02
s13860121	22:40:37.14	30	R	29	2.0	09 37 30.234	+48 44 28.86	0.19	16.62 ± 0.02
s13860122	22:43:43.62	120	B	29	2.0	09 37 29.177	+48 44 35.07	0.19	17.22 ± 0.02
s13860123	22:46:02.01	60	V	30	2.0	09 37 28.358	+48 44 39.43	0.18	16.83 ± 0.02
s13860124	22:47:13.87	30	R	30	2.0	09 37 27.929	+48 44 41.81	0.11	16.61 ± 0.02
s13860125	22:49:54.56	120	B	30	2.0	09 37 26.964	+48 44 47.28	0.20	17.23 ± 0.02
s13860126	22:52:03.73	60	V	30	2.0	09 37 26.209	+48 44 50.86	0.17	16.87 ± 0.02
s13860127	22:53:15.62	30	R	31	2.0	09 37 25.857	+48 44 53.11	0.14	16.60 ± 0.02
s13860128	22:54:51.87	120	B	31	2.0	09 37 25.330	+48 44 56.44	0.11	17.22 ± 0.02
s13860129	22:56:46.85	60	V	31	2.5	09 37 24.647	+48 45 00.29	0.23	16.84 ± 0.02
s13860130	22:58:59.68	30	R	32	2.5	09 37 23.877	+48 45 04.88	0.14	16.62 ± 0.02

$$U(\lambda) = \frac{I_{45}(\lambda) - I_{135}(\lambda)K_U(\lambda)}{I_{45}(\lambda) + I_{135}(\lambda)K_U(\lambda)}, \quad (5)$$

где  $K_Q$  и  $K_U$  — инструментальные параметры, зависящие от пропускания поляризационных каналов, которые определяются из наблюдений звезд с нулевой поляризацией. Здесь  $I_0(\lambda)$ ,  $I_{90}(\lambda)$ ,  $I_{45}(\lambda)$  и  $I_{135}(\lambda)$  — измеренные интенсивности в спектрах, соответствующих разным направлениям поляризации. Степень поляризации  $P$  и угол плоскости поляризации  $PA$  вычисляются из Соотношения (2).

Зависимости параметров поляризации астерои-

да 1994 UG от длины волны показаны на рис. 6, на котором приводятся (сверху вниз): исправленный за спектральную чувствительность поток  $F(\lambda)$  в спектре объекта в диапазоне 420–800 нм, нормированные параметры Стокса  $Q(\lambda)$  и  $U(\lambda)$ , степень поляризации  $P(\lambda)$  и позиционный угол плоскости поляризации  $PA(\lambda)$ . Рядом со спектром объекта в произвольных единицах показан спектр Солнца согласно международному стандар-

ту ISO 9845-1:1992<sup>1</sup>. В спектре астероида хорошо видны фраунгоферовы линии поглощения, а непрерывный спектр показывает заметное покраснение по сравнению с солнечным континуумом. Широкие абсорбционные детали на длинах волн 690 нм и 760 нм — молекулярные полосы поглощения в атмосфере Земли. Распределение энергии в спектре астероида указывает на то, что он относится к S-классу [14]. На рисунке видно, что степень поляризации падает с увеличением длины волны. Результат интегрирования поляризованного спектра в полосах фотометрической системы Джонсона дает следующие оценки степени поляризации в различных цветах:  $P_B = (6.2 \pm 0.6)\%$ ,  $P_V = (3.5 \pm 0.5)\%$  и  $P_R = (2.5 \pm 0.3)\%$ . Отметим, что угол плоскости поляризации с точностью до ошибок не изменяется в нашем спектральном диапазоне, как и должно быть при наблюдениях астероида. Фазовый угол астероида на момент наблюдений составил  $46^\circ 5'$ . Такие параметры астероида 1994 UG близки к поляриметрическим измерениям в широких полосах для сближающегося с Землей астероида (1685) Торо [7].

Первые данные по спектрополяриметрии ярких астероидов были получены в работе [15], а спектрополяриметрия слабых СЗА сделана нами впервые. Сравнение нормированных зависимостей степени поляризации от длины волны с данными, полученными для астероида S-типа Эрос при фазовом угле  $42^\circ$  (см. рис. 3 в работе [15]) показывает поразительное сходство с нашими данными. При этом следует отметить, что в нашем случае поляризация в V-полосе больше поляризации Эроса приблизительно в два раза. Это обстоятельство может указывать на то, что по характеру изменения альbedo с длиной волны и степени поляризации поверхность астероида 1994 UG близка по свойствам к поверхности морей Луны [16] на больших фазовых углах.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые проведены спектрополяриметрические наблюдения слабых астероидов, сближающихся с Землей. Для астероида 1994 UG показано, что он относится к таксономическому классу S и характеристики его поверхности близки по поляризационным свойствам к поверхности морей Луны. У слабого астероида 2009 DL46 зарегистрировано сильное увеличение поляризации со временем (с <sup>1</sup><http://www.pveducation.org/pvcdrom/appendices/standard-solar-spectra>

3% до 14%), что свидетельствует о неоднородности поверхности.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Н. Н. Киселеву за ценные критические замечания и администрации САО РАН за выделение времени для наблюдений астероидов. Работа поддержана грантом РФФ, проект 16-12-00071.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. Morate, J. de León, M. De Prá, et al., *Astron. and Astrophys.* **586**, A129 (2016).
2. C. R. Chapman, D. Morrison, and B. Zellner, *Icarus* **25**, 104 (1975).
3. M. I. Mishchenko, V. K. Rosenbush, N. N. Kiselev, et al., arXiv:1010.1171 (2010).
4. R. P. Binzel, D. Lupishko, M. di Martino, et al., *Physical Properties of Near-Earth Objects* (Univ. Arizona Press, Tucson, 2002), pp. 255–271.
5. S. J. Bus, F. Vilas, and M. A. Barucci, *Visible-Wavelength Spectroscopy of Asteroids* (Univ. Arizona Press, Tucson, 2002), pp. 169–182.
6. D. F. Lupishko and S. V. Vasilyev, *NASA Planetary Data System* **184**, EAR-A-3-RDR-APD-POLARIMETRY-V7.0 (2012).
7. N. N. Kiselev, D. F. Lupishko, G. P. Chernova, and I. G. Shkuratov, *Kinematics and Physics of Celestial Bodies* **6**, 77 (1990).
8. M. Ishiguro, H. Nakayama, M. Kogachi, et al., *Publ. Astron. Soc. Japan* **49**, L31 (1997).
9. I. N. Belskaya, S. Fornasier, and Y. N. Krugly, *Icarus* **201**, 167 (2009).
10. N. N. Kiselev, V. K. Rosenbush, K. Jockers, et al., in *Proc. Intern. Conf. on Asteroids, Comets, and Meteors — ACM 2002, Berlin, Germany, 2002*, Ed. by B. Warmbein, ESA SP **500** (ESA Publ. Division, Noordwijk, 2002), pp. 887–890.
11. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Baltic Astronomy* **20**, 363 (2011).
12. J. L. Russell, B. M. Lasker, B. J. McLean, et al., *Astron. J.* **99**, 2059 (1990).
13. V. L. Afanasiev and V. R. Amirkhanyan, *Astrophysical Bulletin* **67**, 438 (2012).
14. E. S. Howell, E. Merenyi, and L. A. Lebofsky, *J. Geophys. Research* **99**, 10 (1994).
15. S. Bagnulo, A. Cellino, and M. F. Sterzik, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **446**, L11 (2015).
16. N. V. Opanasenko and Y. G. Shkuratov, *Astronomicheskii Vestnik* **28**, 133 (1994).



**Observations of Near-Earth Asteroids in Polarized Light****V. L. Afanasiev and A. V. Ipatov**

We report the results of position, photometric, and polarimetric observations of two near-Earth asteroids made with the 6-m telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences. 1.2-hour measurements of the photometric variations of the asteroid 2009 DL46 made on March 8, 2016 ( $\sim 20^m$  at a distance of about 0.23 AU from the Earth) showed a  $0^m.2$ -amplitude flash with a duration of about 20 minutes. During this time the polarization degree increased from the average level of 2–3% to 14%. The angle of the polarization plane and the phase angle were equal to  $113^\circ \pm 1^\circ$  and  $43^\circ$ , respectively. Our result indicates that the surface of the rotating asteroid (the rotation period of about 2.5 hours) must be non-uniformly rough. Observations of another asteroid—1994 UG—whose brightness was of about  $17^m$  and which was located at a geocentric distance of 0.077 AU, were carried out during the night of March 6/7, 2016 in two modes: photometric and spectropolarimetric. According to the results of photometric observations in Johnson's *B*-, *V*-, and *R*-band filters, over one hour the brightness of the asteroid remained unchanged within the measurement errors (about  $0^m.02$ ). Spectropolarimetric observations in the 420–800 nm wavelength interval showed the polarization degree to decrease from 8% in the blue part of the spectrum to 2% in the red part with the phase angle equal to  $44^\circ$ , which is typical for S-type near-Earth asteroids.

Keywords: *small Solar System body—asteroids: photometry and polarimetry*