

УДК 523.682

ОСОБЕННОСТИ ЦВЕТА ПОТОКОВЫХ И СПОРАДИЧЕСКИХ МЕТЕОРОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАБЛЮДЕНИЙ С СИСТЕМОЙ МИНИ-МЕГАТОРТОРА

© 2019 г. В. С. Усанин^{1*}, Ю. А. Нефедьев^{1**}, М. Г. Соколова^{1***}

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

Поступила в редакцию 24.12.2018 г.; после доработки 20.03.2019 г.; принята к публикации 22.03.2019 г.

Представлены результаты *BVR*-наблюдений метеоров потоков Персеид, Таурид, Орионид, Геминид, Лирид, а также спорадических метеоров, выполненных с системой Мини-МегаТОРТОРА. Построена двухцветная диаграмма для максимумов блеска. Показано, что метеоры потоков Персеид, Таурид, Геминид образуют скопления на двухцветной диаграмме. Для некоторых метеоров рассмотрено изменение цвета с временным разрешением 0.1 с.

DOI: 10.1134/S000462991908005X

1. ВВЕДЕНИЕ

Метеорная астрономия является одной из немногих областей науки, в которой до настоящего времени существенное значение имеют визуальные наблюдения. Одной из важных характеристик, входящих в отчеты о наблюдениях метеоров, является их цвет [1]. Детальные описания цвета метеоров присутствуют в европейских, китайских и японских летописях с XI века [2, 3]. Проводились статистические исследования видимого цвета спорадических и потоковых метеоров [4, 5]. Наряду с такими, характерными для теплового излучения абсолютно черного тела и нормальных звезд цветами, как голубой, белый, желтый, оранжевый, красный, у метеоров иногда также отмечаются зеленый, розовый и фиолетовый цвета [5–7].

Вместе с тем восприятие человеком цвета, особенно в условиях слабого освещения, весьма субъективно. В метеорной астрономии также, насколько это возможно, применяются известные из астрофизики инструментальные и полуинструментальные методы наблюдений.

В ранних работах [8, 9] под показателем цвета метеоров понималась разность фотографической и визуальной звездной величины в максимуме блеска. Были обнаружены зависимость показателя цвета от звездной величины и отсутствие его зависимости от скорости. Высказывалось предположение, что это может быть обусловлено физиологическим эффектом Пуркинье — смещением кривой

видности человеческого зрения в зависимости от яркости наблюдаемого источника. Для проверки гипотезы, одновременно с фотографическими и визуальными, были проведены также фотоэлектрические наблюдения с синим и зеленым, синим и красным фильтрами [10, 11]. Оказалось, что эффект Пуркинье лишь частично может объяснить зависимость показателя цвета от звездной величины метеоров. Большинство дальнейших работ по многоцветной фотометрии метеоров подтверждало эти выводы.

Статистическим методом была найдена зависимость показателя цвета от звездной величины метеоров, найденных на фотопластинках Паломарского атласа, полученных с синечувствительной эмульсией и красным фильтром [12]. Для определения показателей цвета проводились визуальные наблюдения метеоров с бинокулярными телескопами одновременно без фильтра, а также с синим и красным фильтрами [13], визуальные [14] и фотографические [15] наблюдения одновременно без фильтра, с синим, желтым, оранжевым и красным фильтрами. Для точек метеорных траекторий вне максимума блеска была найдена качественно такая же зависимость показателей цвета от звездной величины, как и в максимуме блеска, но с другими значениями численных параметров [16]. Обсуждалась несовместимость фотометрических систем, использовавшихся в различных работах по определению показателей цвета метеоров [17]. По визуальным оценкам цвета статистическим методом были определены показатели цвета для метеоров различных звездных величин и потоков [18]. Узкополосные показатели цвета рассматривались

*E-mail: Vladimir.Usanin@kpfu.ru

**E-mail: star1955@mail.ru

***E-mail: smarina.63@mail.ru

как альтернатива спектроскопии метеоров [19]. Зависимость показателя цвета метеоров от скорости, причем значительно более слабая, чем от звездной величины, была обнаружена лишь в работе [20].

Спектроскопия метеоров имеет даже более длительную историю, чем многоцветная фотометрия. Метеорные спектры состоят из относительно слабого континуума, эмиссионных атомных линий и молекулярных полос. Традиционная стандартная классификация, основанная на характере метеорного спектра в максимуме блеска и включающая отождествление самых сильных особенностей, дает определения четырем главным типам: *Y* — линии *H* и *K* *Ca II* являются самыми сильными особенностями в сине-фиолетовой части спектра, *X* — линии *D* *Na I* или линии около 5180 Å или 3835 Å *Mg I* дают самую сильную особенность в оранжево-зеленой или сине-фиолетовой части спектра, *Z* — линии *Fe I* или *Cr I* дают самую сильную особенность в оранжево-зеленой или сине-фиолетовой части спектра, *W* — необычные спектры [21, 22]. Позже выяснилось, что метеорные спектры состоят из двух компонентов: главного с температурой около 4000 К и вторичного с температурой около 10 000 К. Стандартная классификация отражает переменную интенсивность спектра высокотемпературной части, составляющей от 0.02 до 5% паровой оболочки метеоров [23]. Метеорные видеоспектры имеют низкое разрешение, и обычно в них могут быть разрешены только линии *Mg*, *Na*, *Fe*. Поэтому применяется также другая классификация, которая предполагает нанесение интенсивностей этих линий на тройную диаграмму *Na–Mg–Fe*, в результате чего могут быть отождествлены следующие классы: нормальные, бедные натрием, бедные железом, с повышенным содержанием натрия, железные, безнатриевые и богатые натрием; первые четыре класса составляют большинство метеороидов [24].

В работе [25] отмечалось отсутствие корреляции видимого цвета метеоров с типом спектра. К одному потоку могут принадлежать метеоры со спектрами разных типов. Была обнаружена корреляция между скоростью метеора и степенью возбуждения атомов (то есть относительной интенсивностью различных эмиссионных линий) [21]. Эти результаты, полученные в более ранних работах, в общих чертах остаются принятыми до настоящего времени [26, 27]. Однако до сих пор остается неясным, может ли спектроскопия дать информацию о свойствах метеоров [28].

Применение в большинстве работ нестандартных фотометрических систем затрудняет их воспроизведение и сравнение между собой. В частности, из предшествующих наблюдений нельзя сделать определенного вывода о средних показателях цвета метеорных потоков. Так, из [15] следует,

что в последовательности Тауриды—Ориониды—Персеиды средние показатели цвета возрастают более чем на 1.5^m , согласно [18] возрастание происходит в последовательности Геминиды—Персеиды—Тауриды—Ориониды, а в [20] средние показатели цвета этих четырех потоков различаются между собой лишь на 0.1^m . Также обсуждалось противоречие между наличием зависимости от скорости метеоров для интенсивностей спектральных эмиссионных линий и отсутствием таковой для показателей цвета [14, 20].

Таким образом, вопрос о разработке инструментального способа исследования цвета метеоров, который, с одной стороны, допускал бы сопоставление с визуальными данными, а с другой стороны, был бы лишен субъективности и легко воспроизводим, остается актуальным.

2. МЕТОД ДВУХЦВЕТНЫХ ДИАГРАММ

Двухцветные диаграммы хорошо известны в астрофизике как способ исследования избытков цвета. С самого зарождения многоцветной фотометрии они использовались для описания собственного излучения звезд [29]. Также двухцветные диаграммы лежат в основе спектральной классификации астероидов по отраженному ими свету [30]. Тот же метод широко применяется и к объектам внешней части Солнечной системы [31–33]. Были построены двухцветные диаграммы для искусственных спутников Земли [34].

На двухцветной диаграмме можно провести линию, соответствующую тепловому излучению абсолютно черного тела различных температур. На диаграммах видимого диапазона последовательности нормальных звезд располагаются недалеко от нее, поскольку в этом диапазоне лишь небольшая часть излучения поглощается в линиях, и линии поглощения распределены по длинам волн достаточно равномерно. Если какой-либо астрофизический объект сильно отклоняется от указанных последовательностей, можно сразу предположить его необычную природу.

Следует особо выделить диаграмму, построенную по широко применяемым в астрофизике показателям цвета $B - V$ и $V - R$, так как в данном случае полосы пропускания всех трех фильтров лежат в видимом диапазоне спектра. Эти фильтры близки, хотя и не тождественны, фильтрам системы Байера RGB , используемой в бытовой электронике для получения и воспроизведения информации о видимом цвете [35]. По сути система RGB копирует принцип действия человеческого колбочкового зрения. Следовательно, система BVR , с одной стороны, стандартна для астрофизики, а с другой стороны, позволяет получить представление о цвете, видимом человеком.

3. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Наблюдения, результаты обработки которых представлены в данной статье, были выполнены по нашей заявке с многоканальным мониторинговым телескопом Мини-МегаТОРТОРА (ММТ-9), принадлежащим Казанскому федеральному университету и расположенным в Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук [36]. Эта система состоит из 9 камер, установленных попарно на 5 экваториальных монтировках. Основными элементами каждой камеры являются объектив Canon EF85/1.2, матрица Andor Neo sCMOS и целостатное зеркало. Временное разрешение ММТ-9 составляет 0.1 с. При необходимости в световой пучок каждой камеры могут вводиться фильтры системы Джонсона-Казинса *BVR* [37]. Наименьшую чувствительность имеют каналы, работающие с фильтром *B*, наибольшую — с фильтром *R*.

Подробное описание фотометрической системы ММТ-9 дано в [38]. Программное обеспечение ММТ-9 оценивает интенсивность вдоль метеорного трека, выделенного с использованием преобразования Хафа [39]. В базу данных вносится как интегральный (то есть вычисленный из проинтегрированной вдоль метеорного трека интенсивности) блеск на отдельных кадрах [40], так и профиль интенсивности вдоль метеорного трека. Отметим, что в работах [8, 9, 11], где приемником излучения была фотографическая эмульсия, съемка выполнялась с длительной выдержкой, поэтому действительное время экспозиции метеора было намного меньше, чем время экспозиции звезд сравнения, и для определения звездной величины требовалось введение поправки за скорость. Это, впрочем, не составляло затруднения, так как видимые скорости звезд определяются известной угловой скоростью вращения Земли, а видимая скорость метеора могла быть измерена с помощью обтюратора [41, 42]. Очевидно, что поправка за скорость не зависит от фотометрической полосы, и при вычислении разности звездных величин одного и того же метеора, полученных с одинаковыми объективами и приемниками излучения, но в двух разных фильтрах, эта поправка исключается, то есть в показателях цвета она отсутствует [15, 16]. Современные приемники излучения позволяют выполнять съемку с выдержками, меньшими, чем длительность метеорного явления, следовательно, время экспозиции звезд на отдельном кадре становится равно времени экспозиции метеора, поэтому, при условии интегрирования интенсивности вдоль метеорного трека, поправка за скорость не применяется для определения звездной величины [43], а тем более показателей цвета. Мы используем именно значения интегральных звездных величин

метеоров на отдельных кадрах, доступные в базе данных ММТ-9.

BVR-наблюдения метеоров проводились преимущественно во время действия главных метеорных потоков с мая 2015 г. по апрель 2016 г. Их первичные результаты, как и других наблюдений метеоров, выполняемых с ММТ-9, были автоматически внесены в базу данных¹. При проведении этих наблюдений каналы были синхронизированы по времени. Рассинхронизация меток времени в базе данных не свидетельствует о физической рассинхронизации каналов, в чем можно убедиться, проанализировав астрометрические данные. В данной статье мы рассматриваем метеоры, которые наблюдались во всех трех фильтрах, когда в фильтре *V* отмечался максимум блеска. Были исключены из обработки наблюдения, в которых показатели цвета могли быть определены неверно вследствие того, что в разных фильтрах измерялись разные части трека метеора. В первую очередь, это относится к случаям, когда изображение метеора пересекает границу кадра. Кроме того, программное обеспечение ММТ-9 измеряет автоматически только одну непрерывную часть трека, а потому необходимо обратить внимание на случаи, когда изображение метеора является прерывистым (отрыв стойкого следа в хвостовой части метеора; слабый метеор, наблюдаемый на пределе чувствительности). В табл. 1 приведен список идентификаторов в базе данных ММТ-9 66 метеоров, вошедших в итоговую выборку.

На основании принципов, рассмотренных в [44], нами была проверена принадлежность метеоров к главным потокам: η -Аквариды, Южные δ -Аквариды, Персеиды, Дракониды, Южные Тауриды, Ориониды, Северные Тауриды, Леониды, Геминиды, Урсиды, Квадрантиды, Лириды. В итоге 8 метеоров были отождествлены как Персеиды, 6 — Южные Тауриды, 1 — Ориониды, 2 — Северные Тауриды, 15 — Геминиды, 1 — Лириды, остальные 33 не отождествлены ни с одним из указанных потоков. Результаты отождествления отдельных метеоров также даны в табл. 1.

4. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О НАБЛЮДАВШИХСЯ ПОТОКАХ

Исходя из общих соображений, можно ожидать, что цвет метеора будет в той или иной мере зависеть от скорости и химического состава породившего его метеороида. Скорость метеороида напрямую зависит от элементов орбиты его родительского тела (кометы или астероида). Химический состав может быть связан с элементами орбиты косвенно:

¹ <http://www.astroguard.ru/meteors>

Таблица 1. Список исследуемых метеоров

№	Id B	Id V	Id R	Поток	№	Id B	Id V	Id R	Поток
1	7616498	7616500	7616501		34	9167226	9167228	9167227	ORI
2	8292831	8292834	8292832		35	9178196	9178199	9178197	
3	8293684	8293686	8293685		36	9187883	9187884	9187885	NTA
4	8316513	8316514	8316512		37	9187922	9187923	9187924	
5	8339660	8339663	8339661		38	9188079	9188080	9188081	STA
6	8344020	8344018	8344019		39	9188119	9188121	9188123	
7	8356932	8356934	8356933		40	9442888	9442890	9442891	NTA
8	8358097	8358101	8358100	PER	41	9477959	9477957	9477960	STA
9	8358347	8358349	8358348		42	9523610	9523609	9523611	
10	8359289	8359291	8359290	PER	43	9697469	9697471	9697470	GEM
11	8363316	8363318	8363317		44	9697483	9697482	9697484	GEM
12	8365630	8365632	8365629		45	9698051	9698052	9698053	GEM
13	8369150	8369151	8369152		46	9701729	9701733	9701732	GEM
14	8370806	8370808	8370810		47	9701813	9701814	9701815	
15	8370871	8370873	8370872	PER	48	9702155	9702156	9702157	GEM
16	8371360	8371362	8371363		49	9705210	9705211	9705212	GEM
17	8372337	8372340	8372338	PER	50	9705823	9705824	9705825	GEM
18	8373345	8373347	8373346	PER	51	9705858	9705859	9705860	GEM
19	8378202	8378203	8378204	PER	52	9705863	9705865	9705864	
20	8378429	8378430	8378427	PER	53	9706791	9706792	9706793	GEM
21	8388492	8388493	8388494		54	9706850	9706852	9706854	GEM
22	8396589	8396590	8396591		55	9706975	9706977	9706976	
23	8397092	8397094	8397093	PER	56	9709172	9709175	9709174	GEM
24	8403654	8403656	8403655		57	9710964	9710965	9710967	GEM
25	9032882	9032884	9032883		58	9711658	9711659	9711660	GEM
26	9034032	9034034	9034033		59	9720197	9720201	9720200	GEM
27	9041258	9041260	9041259		60	9720350	9720353	9720355	
28	9050887	9050888	9050889	STA	61	9722168	9722169	9722170	GEM
29	9051567	9051568	9051569		62	9804765	9804766	9804764	
30	9053143	9053145	9053146	STA	63	10025040	10025039	10025041	
31	9055178	9055182	9055179	STA	64	10054057	10054060	10054062	
32	9165236	9165238	9165237		65	10397610	10397613	10397614	
33	9165926	9165928	9165927	STA	66	10397723	10397725	10397726	LYR

потеря летучих веществ определяется интенсивностью и частотой нагревания при сближениях малого тела с Солнцем, поэтому кометы (малые

тела, которые выделяют много летучих веществ) и астероиды (малые тела, которые практически не выделяют летучих веществ) обычно находятся на

существенно разных орбитах. Приведем краткие сведения о метеорных потоках, отождествленных нами в *BVR*-наблюдениях с ММТ-9, и их происхождении [45, 46].

Родительским телом Персеид (PER) является комета Свифта-Тутля (109P). Ее перигелийное расстояние $q = 0.96$ а. е., афелийное расстояние $Q = 51$ а. е., период обращения вокруг Солнца $P = 133$ года, наклон орбиты к плоскости эклиптики $i = 113^\circ$. Таким образом, она относится к кометам галлеевского типа. Средняя скорость входа метеорных тел в атмосферу Земли составляет 60.1 км/с.

Южные (STA) и Северные (NTA) Тауриды представляют собой ветви большого комплекса Таурид (TAU), основным телом в котором является комета Энке (2P). Элементы орбиты кометы: $q = 0.34$ а. е., $Q = 4.1$ а. е., $P = 3.3$ года, $i = 11.8^\circ$. Она отличается от комет семейства Юпитера меньшим афелийным расстоянием, поэтому в настоящее время классифицируется как комета типа Энке. Кроме того, в составе комплекса открыто большое количество астероидов [47]. Средняя скорость метеоров 28.8 км/с для STA и 30.1 км/с для NTA.

Ориониды (ORI) — один из двух потоков (наряду с η -Акваридами), образуемых кометой Галлея (1P). Комета является определяющей для галлеевского типа: $q = 0.59$ а. е., $Q = 35$ а. е., $P = 75$ лет, $i = 162^\circ$. По старой классификации относилась к семейству Нептуна. Средняя скорость входа частиц в атмосферу 67.2 км/с.

Родительским телом Геминид (GEM) считается астероид Фазтон (3200). Орбита астероида имеет элементы $q = 0.140$ а. е., $Q = 2.4$ а. е., $P = 1.43$ года, $i = 22^\circ$, что позволяет отнести его к группе Аполлона. В одном из прохождений перигелия у данного астероида наблюдались признаки кометной активности [48], однако его афелийное расстояние гораздо меньше, чем у комет, которые проявляют активность в каждом появлении. Структура потока обеспечивается кометной моделью его образования [49]. Метеоры имеют среднюю скорость 35.6 км/с.

Лириды (LYR) связывают с долгопериодической кометой Тетчера (C/1861 G1), наблюдавшейся лишь в одном возвращении к Солнцу в 1861 г. и имеющей элементы орбиты: $q = 0.92$ а. е., $Q \approx 110$ а. е., $P \approx 415$ лет, $i = 80^\circ$. Средняя скорость метеоров 48.0 км/с.

Метеоры, которые не были отождествлены с перечисленными выше потоками, мы принимаем за спорадические (SPO).

5. ДВУХЦВЕТНАЯ ДИАГРАММА ДЛЯ МАКСИМУМОВ БЛЕСКА

На рис. 1 представлена двухцветная диаграмма для максимумов блеска в фильтре *V* всех 66 рассматриваемых метеоров. В качестве ориентиров показаны линии теплового излучения абсолютно черного тела различных температур [50] и главной последовательности звезд [37]. Фон диаграммы построен путем сопоставления цветам *BVR* соответствующих цветов *RGB* без поправок за преобразование между фотометрическими системами [35] (поправки имеют смысл, если спектр излучения наблюдаемого источника известен хотя бы приблизительно), белый цвет соответствует Солнцу [51], параметр гамма-коррекции (определяет передачу полутонов) принят равным стандартному значению 2.2. Необходимо отметить, что границы области на двухцветной диаграмме, занимаемой всеми метеорами, могут быть следствием наблюдательной селекции.

Как видно из рис. 1, метеоры потоков Персеид, Таурид, Геминид образуют на двухцветной диаграмме скопления в соответствии с их принадлежностью к потокам, тогда как спорадические метеоры рассеяны по всей диаграмме. Показатели цвета средней точки группы Персеид $\overline{B - V} = +0.76^m$, $\overline{V - R} = +1.02^m$, среднеквадратичное расстояние метеоров на диаграмме от средней точки $\sigma = 0.22^m$, наибольшее расстояние от средней точки равно 0.34^m . Средняя точка группы Таурид имеет $\overline{B - V} = +0.68^m$, $\overline{V - R} = +0.44^m$, среднеквадратичное расстояние метеоров на диаграмме от средней точки $\sigma = 0.10^m$, наибольшее расстояние от средней точки равно 0.15^m . Средняя точка группы Геминид показывает $\overline{B - V} = +0.53^m$, $\overline{V - R} = +0.49^m$, среднеквадратичное расстояние метеоров на диаграмме от средней точки $\sigma = 0.21^m$, наибольшее расстояние от средней точки равно 0.30^m . Расстояние на диаграмме между средними точками Персеид и Таурид составляет 0.58^m , Персеид и Геминид 0.57^m , Таурид и Геминид 0.16^m (рис. 2). Поскольку расстояние между средними точками Персеид и Таурид больше суммы их радиусов, то эти две группы полностью отделены друг от друга. Также из превышения расстояния между средними точками над одним из радиусов групп следует, что средняя точка группы Геминид лежит за пределами группы Таурид, а средние точки каждой из групп Персеид и Геминид расположены взаимно за пределами другой группы. Другие факторы, такие как индивидуальные характеристики метеоров, в том числе звездная величина, и ошибки измерений, включая неточность определения максимума блеска, не вызвали рассеивания скоплений, образованных потоками.

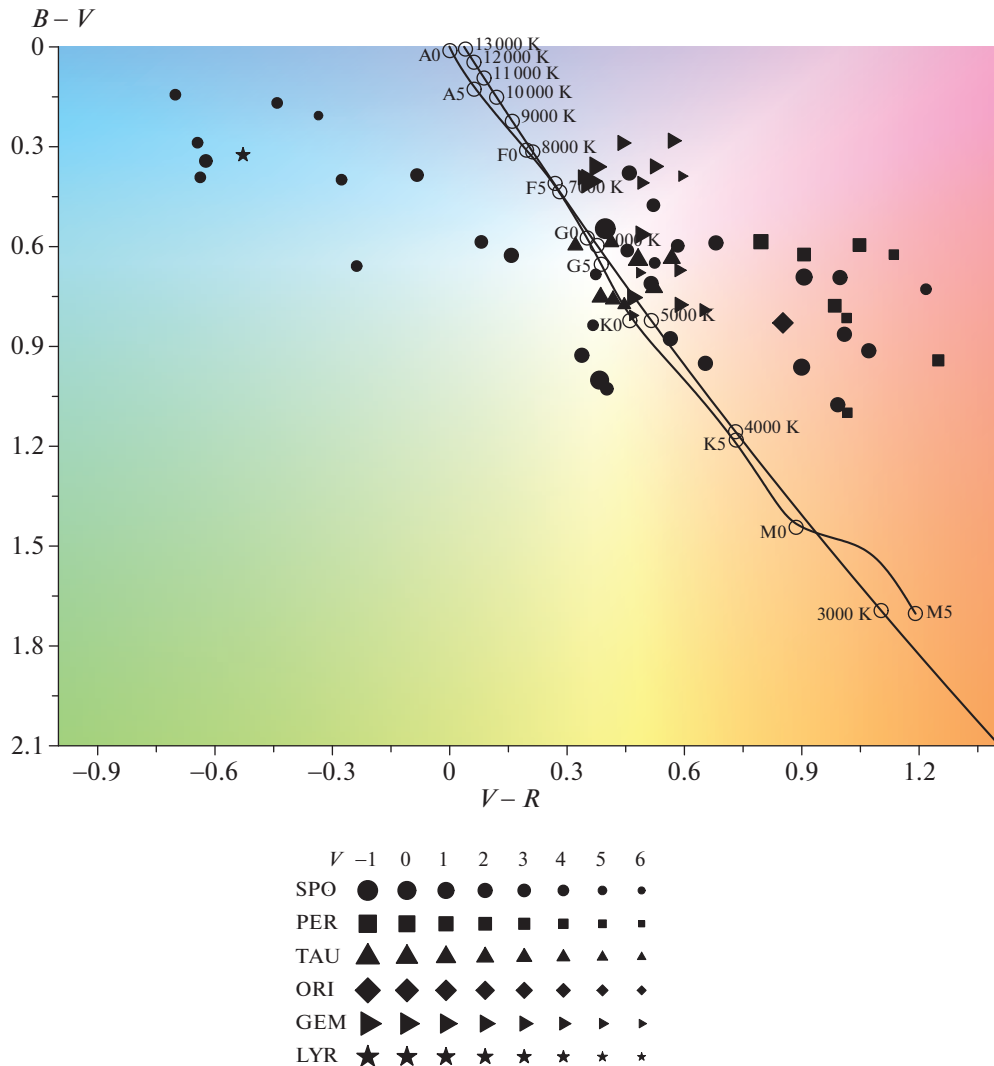


Рис. 1. Двухцветная диаграмма для максимумов блеска.

Тауриды, как Северные, так и Южные, располагаются наиболее близко к линии абсолютно черного тела, в области белого цвета, что соответствует температуре 5000–6000 К и звездам спектрального класса G. Геминиды, частично перекрываясь с Тауридами, располагаются также в направлениях фиолетового и оранжевого цветов. В правой части диаграммы, между розовым и оранжевым цветами, находятся Персеиды и один представитель Орионид. Заметим, что другой метеор потока Орионид (идентификаторы в базе данных ММТ-9: 9188219, 9188222, 9188220) не вошел в итоговую выборку, так как не ясно, достиг ли он максимума блеска до отрыва стойкого следа. Показатели цвета, вычисленные по последним кадрам перед отрывом, помещают его также среди группы Персеид. Единственный метеор потока Лириды, наблюдавшийся в трех фильтрах, оказался в левой части диаграммы,

в области голубого цвета, но другие Лириды, не наблюдавшиеся в фильтре B и потому не вошедшие в итоговую выборку, не дали отрицательных значений $V - R$.

Обычно предполагается, что температура метеора растет по мере возрастания скорости, и, поскольку в метеоре излучают одновременно сотни линий, то следовало бы ожидать возникновения некоего подобия закона Вина и убывания показателя цвета с возрастанием скорости. Однако предшествующие наблюдения показали обратное [20], тот же результат мы видим и на рис. 1: метеоры высокоскоростных потоков Персеид и Орионид оказались гораздо краснее низкоскоростных Геминид и Таурид. Метеор потока Лириды, имеющего промежуточную между ними скорость, расположился в противоположной стороне диаграммы по отношению к высокоскоростным потокам, а не между высоко- и низкоскоростными.

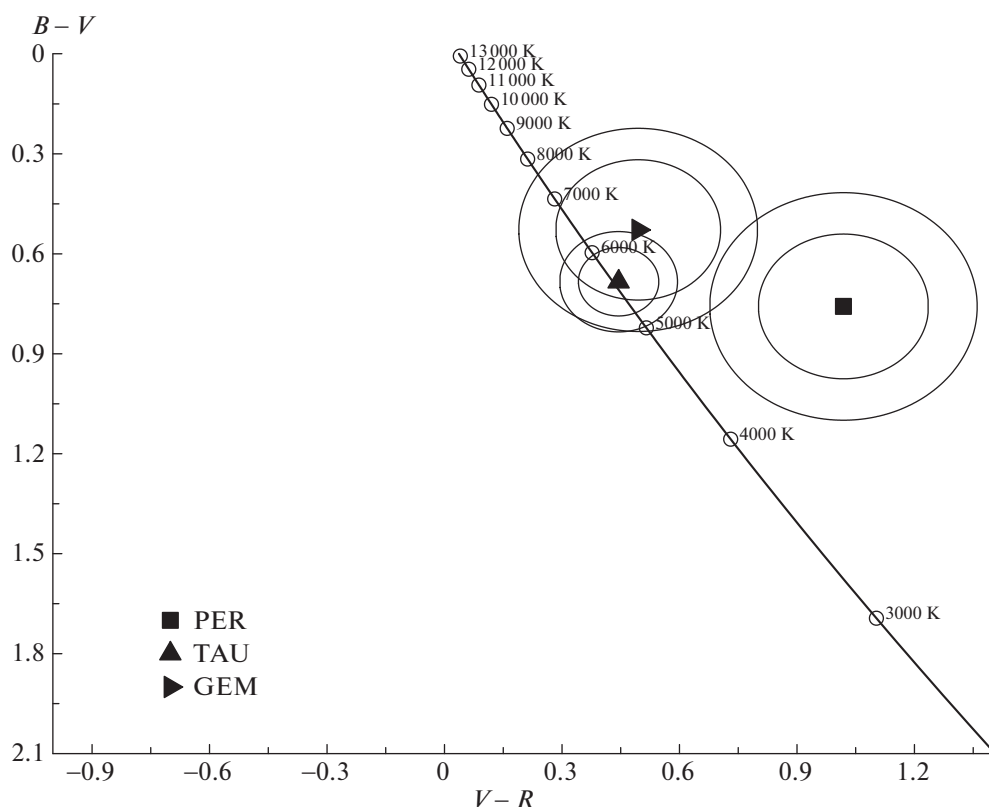


Рис. 2. Двухцветная диаграмма для потоков Персеид, Таурид, Геминид. Показаны средние точки групп, среднеквадратичные расстояния метеоров от средних точек, наибольшие расстояния от средних точек.

Тауриды близки на диаграмме к Геминидам, и оба эти потока могут иметь смешанное кометно-астероидное происхождение [47, 49].

Существенны отличия во взаимном расположении потоковых метеоров на двухцветной диаграмме от их взаимного расположения на спектральной тройной диаграмме Na–Mg–Fe [27]. Так, на двухцветной диаграмме метеор потока Лирид находится в противоположной стороне по отношению к Персеидам и Орионидам, а на диаграмме Na–Mg–Fe эти три потока расположены в одной области. В то же время Тауриды и Геминиды расположены в одной области на двухцветной диаграмме и в противоположных по отношению друг к другу сторонах на диаграмме Na–Mg–Fe. Таким образом, цветовая классификация метеоров в данном случае не совпадает со спектральной и содержит другую информацию, требующую дополнительного изучения.

6. ДВУХЦВЕТНЫЕ ДИАГРАММЫ ДЛЯ ОТДЕЛЬНЫХ МЕТЕОРОВ

Высокое временное разрешение ММТ-9 позволяет проследить изменение цвета метеора с шагом 0.1 с. На рис. 3–26 представлены треки на двухцветных диаграммах метеоров, для которых

показатели цвета определены на всем протяжении от появления до исчезновения, при условии отсутствия пересечения границы кадра, согласно наименее чувствительному каналу и не менее чем по 4-м последовательным кадрам. Порядок рисунков следующий: спорадические метеоры (рис. 3–12), Персеиды (рис. 13), Тауриды (рис. 14–16), Геминиды (рис. 17–25), Лириды (рис. 26), а в пределах каждой группы — по возрастанию величины $V - R$, то есть слева направо на диаграмме. Хронологическая последовательность кадров обозначена на каждом рисунке цифрами около точек.

Рассмотрим сначала диаграммы потоковых метеоров.

Отметим перемещение метеора потока Персеид (рис. 13) справа сверху налево вниз по диаграмме, в направлении зеленого цвета. Та же тенденция роста величины $B - V$ и уменьшения $V - R$ присуща и другим наблюдавшимся метеорам данного потока, которые не удовлетворили тем или иным критериям для построения диаграмм. Просмотр изображений метеоров в базе данных ММТ-9 показал, что именно для Персеид наиболее характерно образование стойких следов, намного более ярких в фильтре V , чем в B и R , то есть имеющих зеленый цвет. Как известно, это излучение авроральной линии ней-

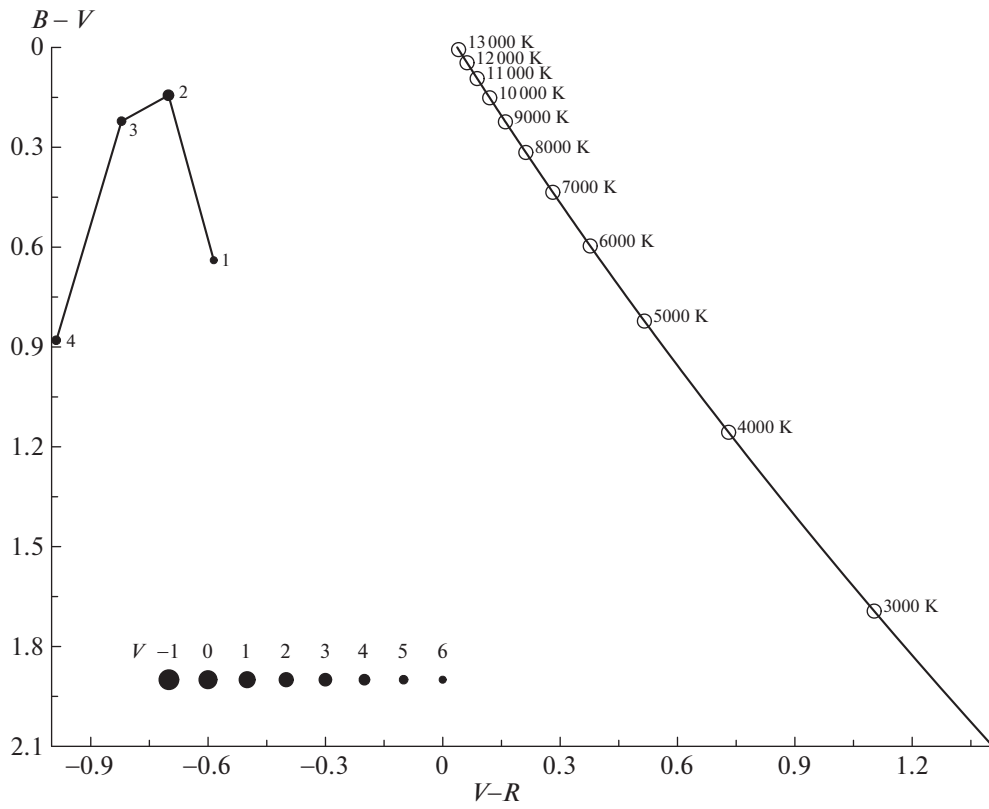


Рис. 3. Двухцветная диаграмма для метеора № 52 (SPO).

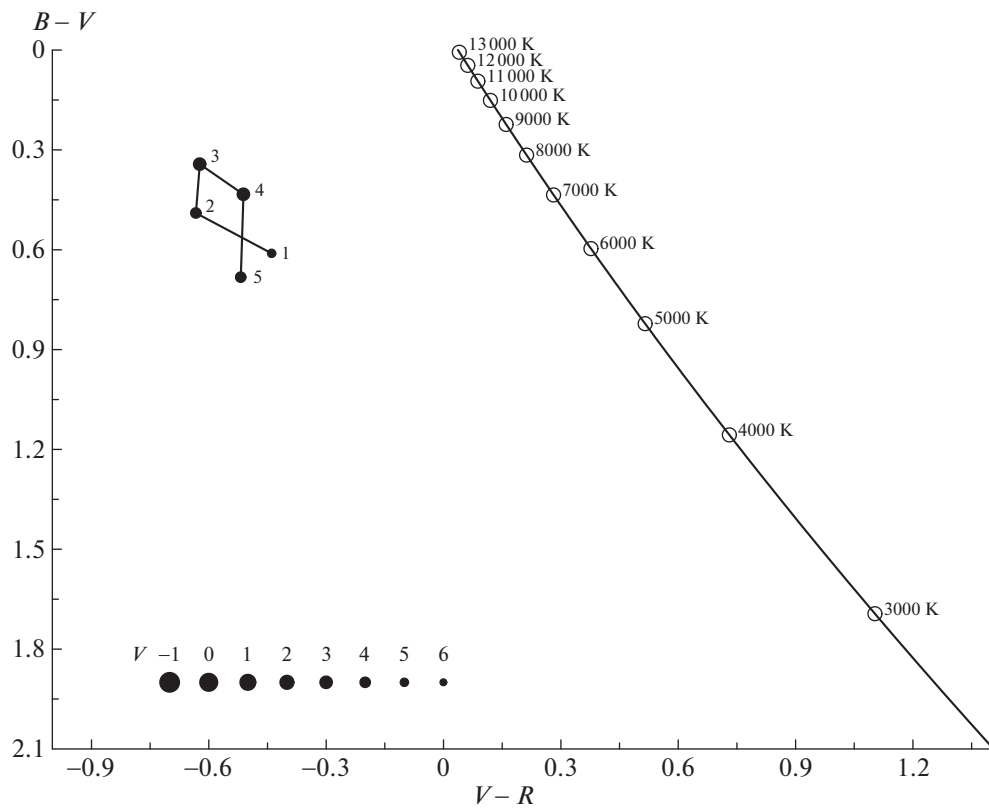


Рис. 4. Двухцветная диаграмма для метеора № 55 (SPO).

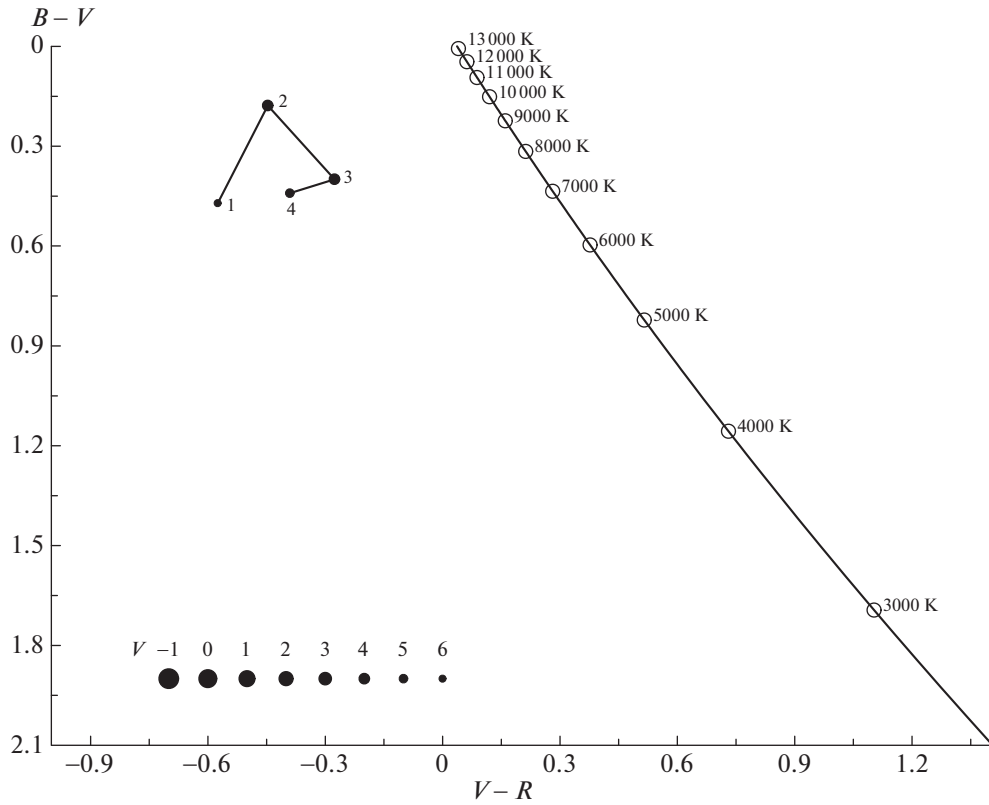


Рис. 5. Двухцветная диаграмма для метеора № 25 (SPO).

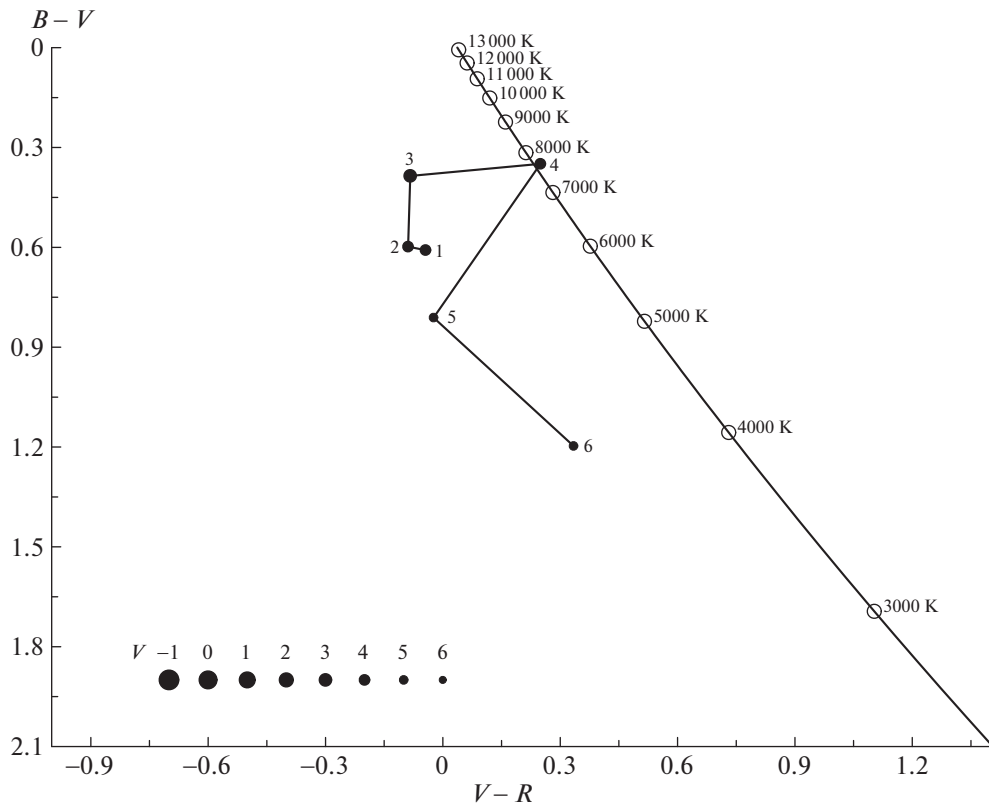


Рис. 6. Двухцветная диаграмма для метеора № 65 (SPO).

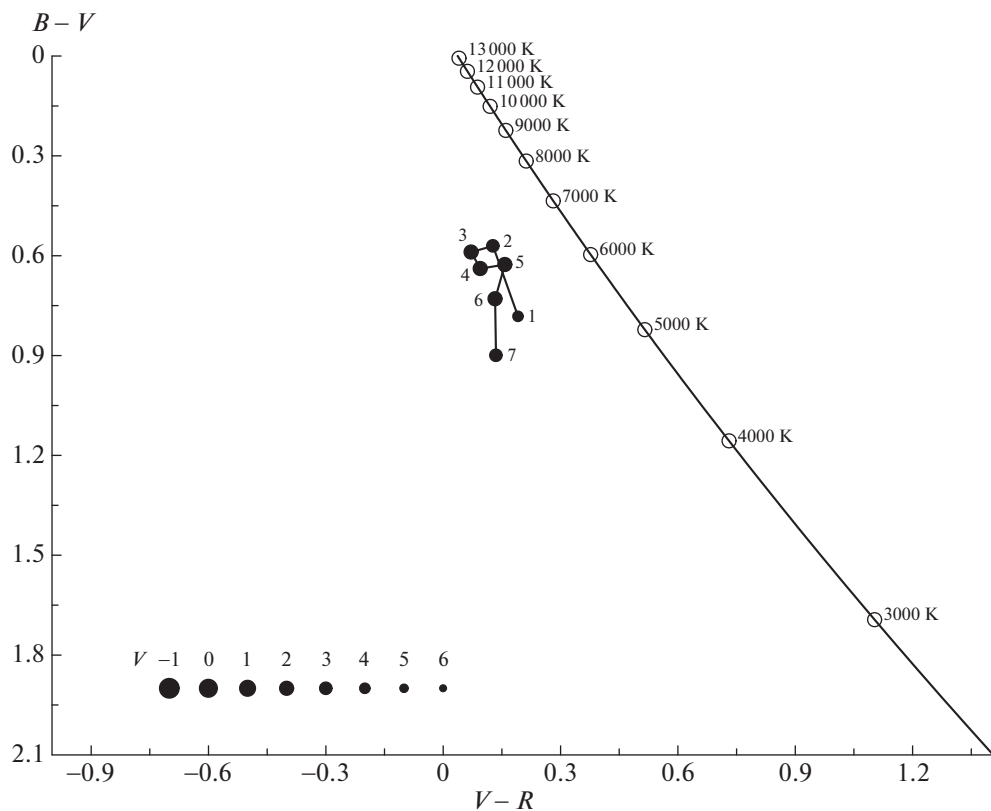


Рис. 7. Двухцветная диаграмма для метеора № 27 (SPO).

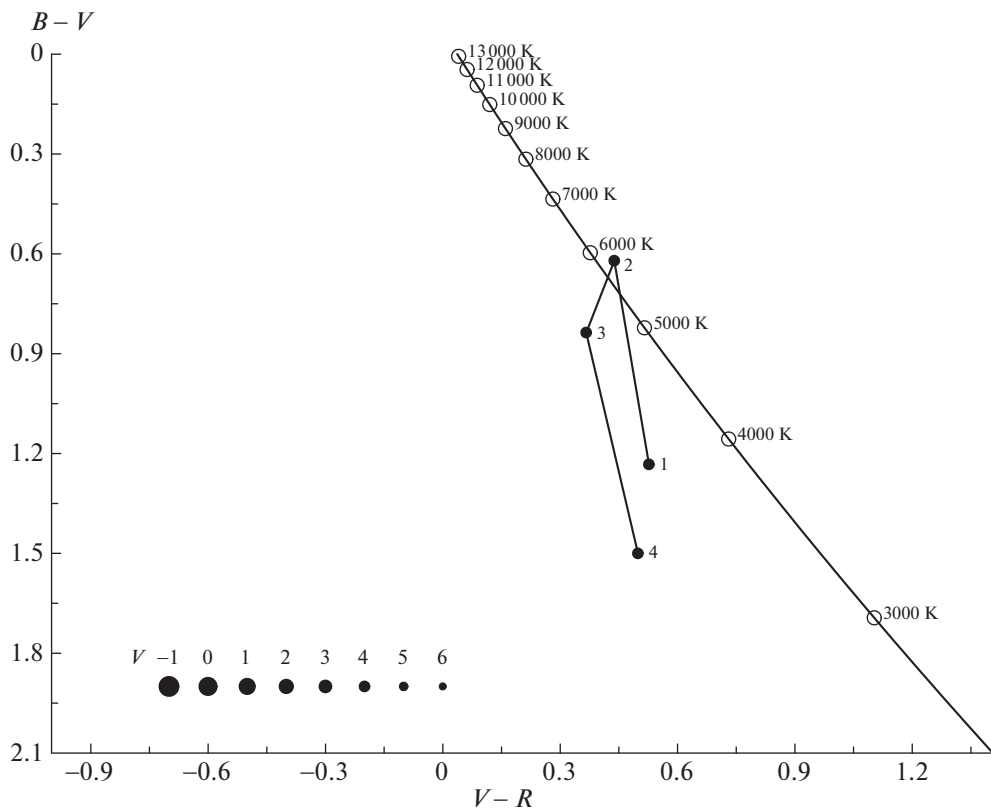


Рис. 8. Двухцветная диаграмма для метеора № 37 (SPO).

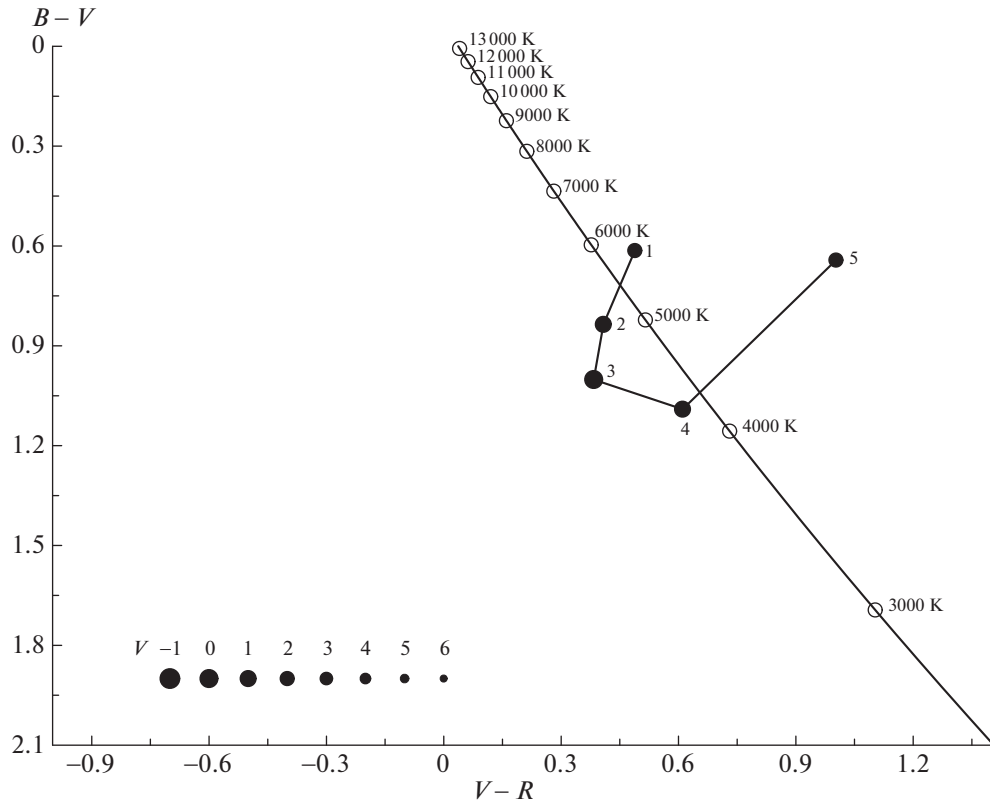


Рис. 9. Двухцветная диаграмма для метеора № 14 (SPO).

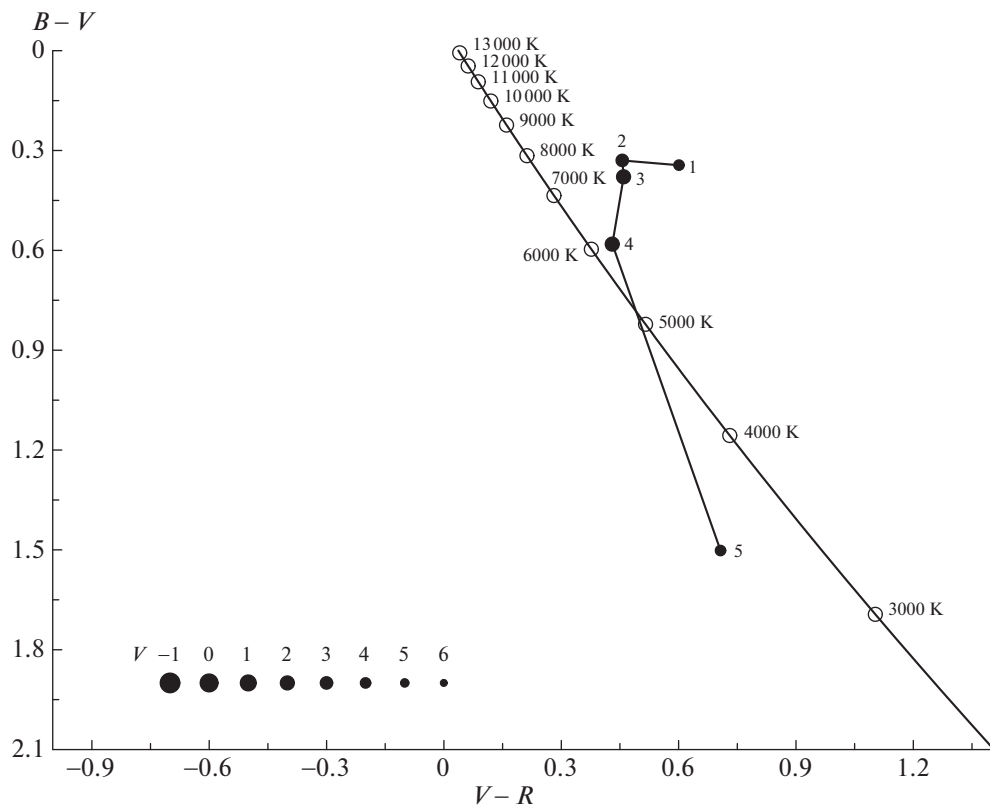


Рис. 10. Двухцветная диаграмма для метеора № 6 (SPO).

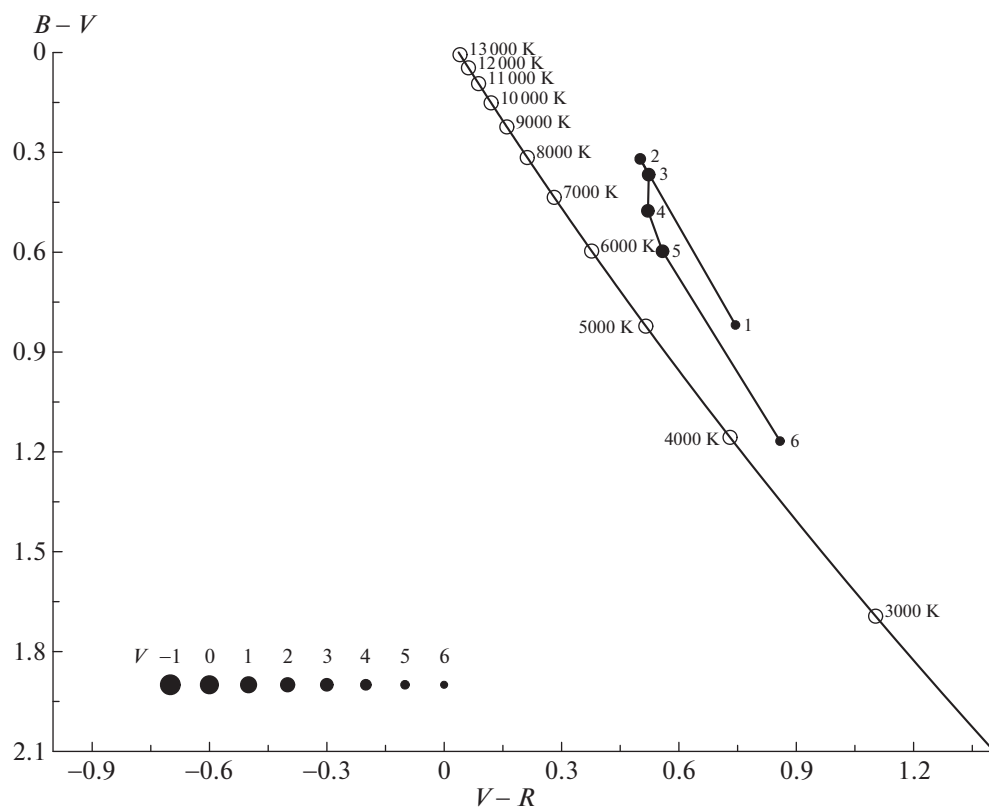


Рис. 11. Двухцветная диаграмма для метеора № 3 (SPO).

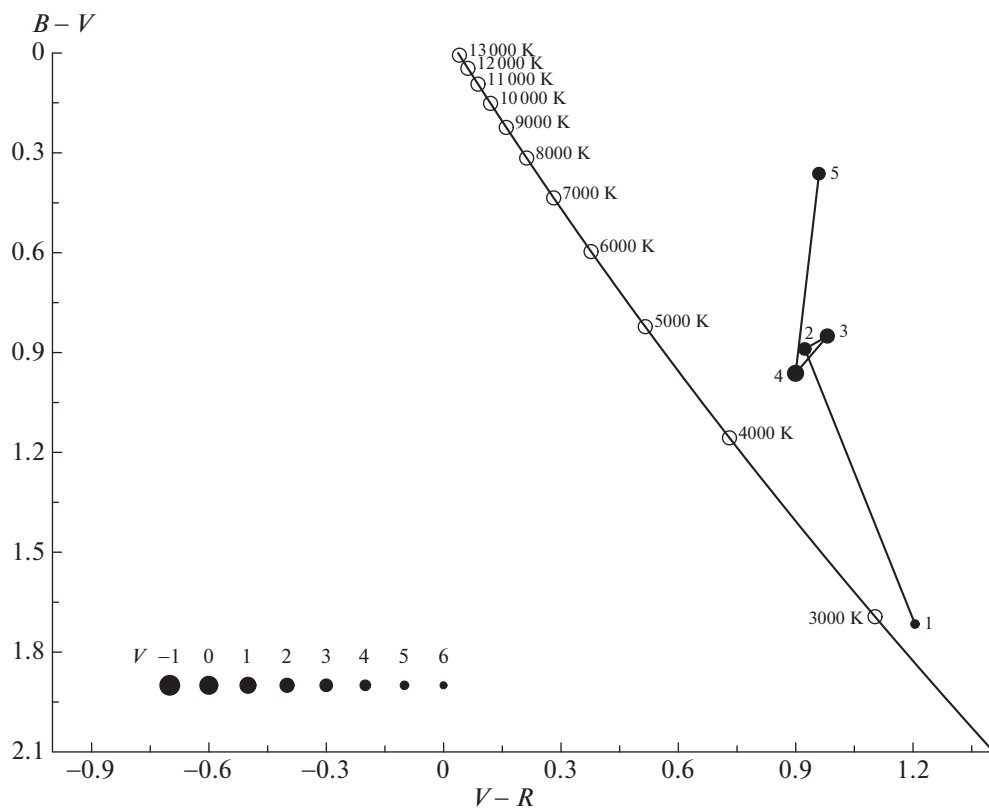


Рис. 12. Двухцветная диаграмма для метеора № 21 (SPO).

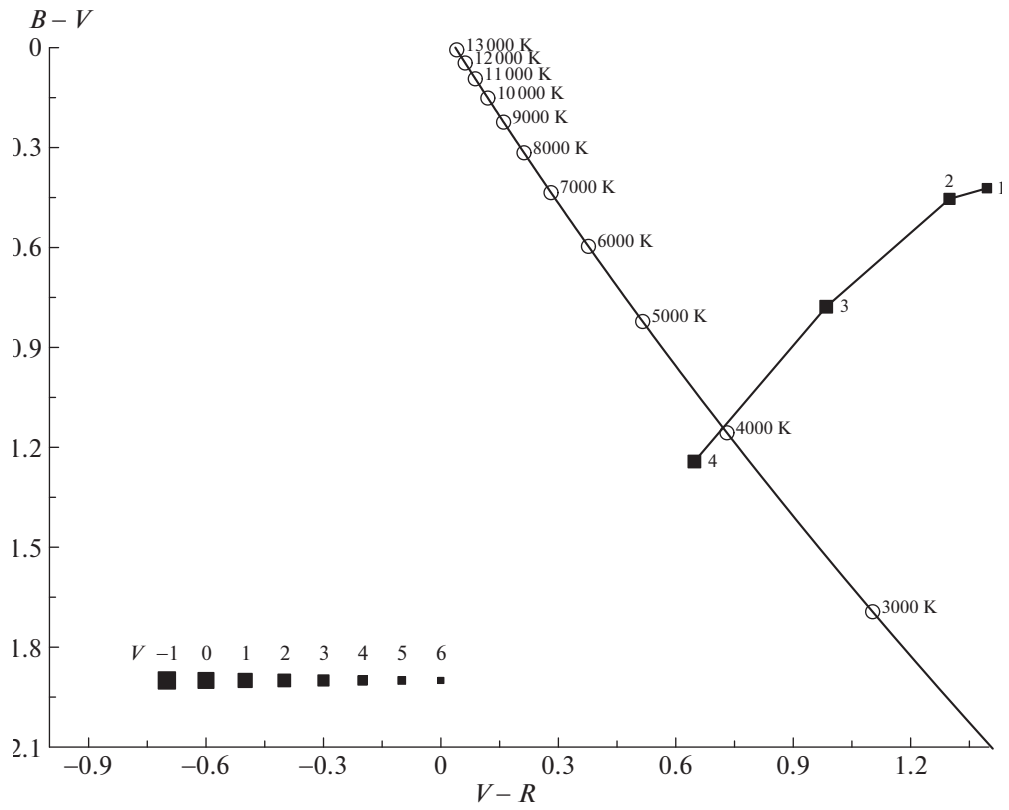


Рис. 13. Двухцветная диаграмма для метеора № 23 (PER).

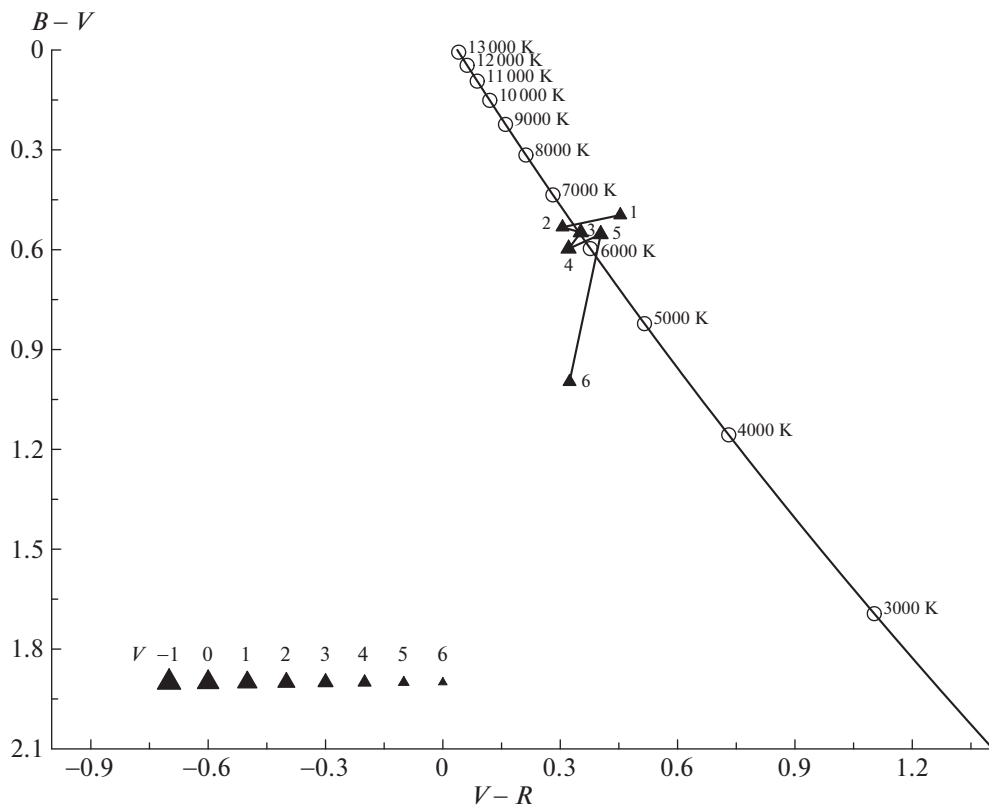


Рис. 14. Двухцветная диаграмма для метеора № 33 (STA).

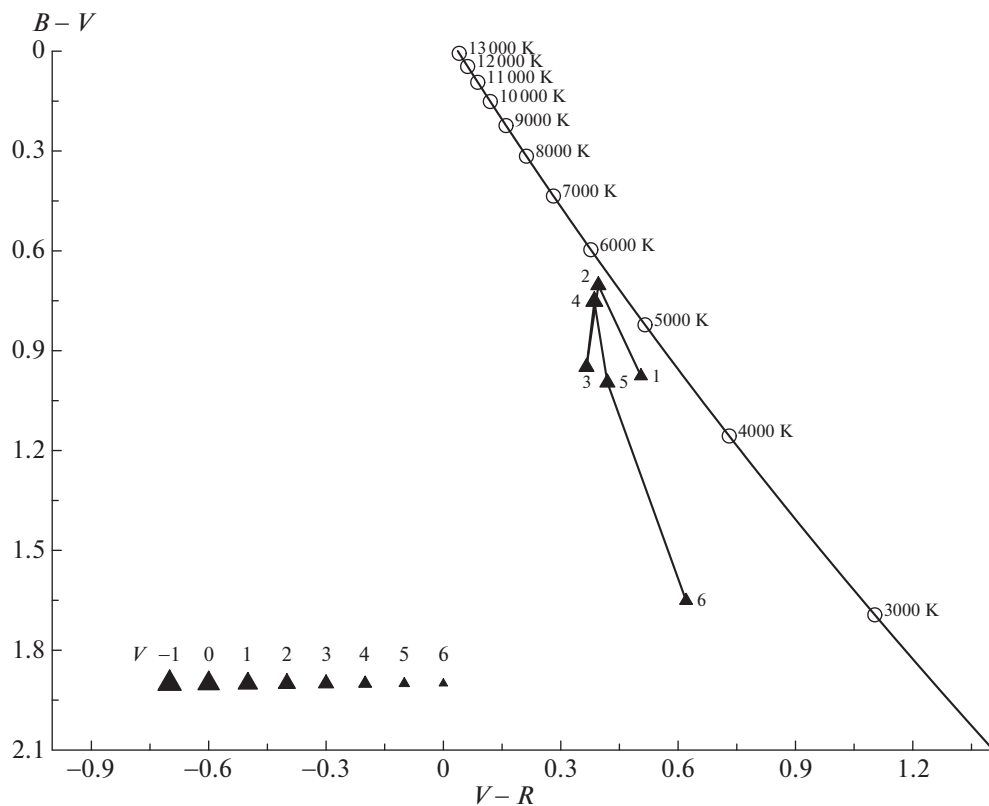


Рис. 15. Двухцветная диаграмма для метеора № 40 (NTA).

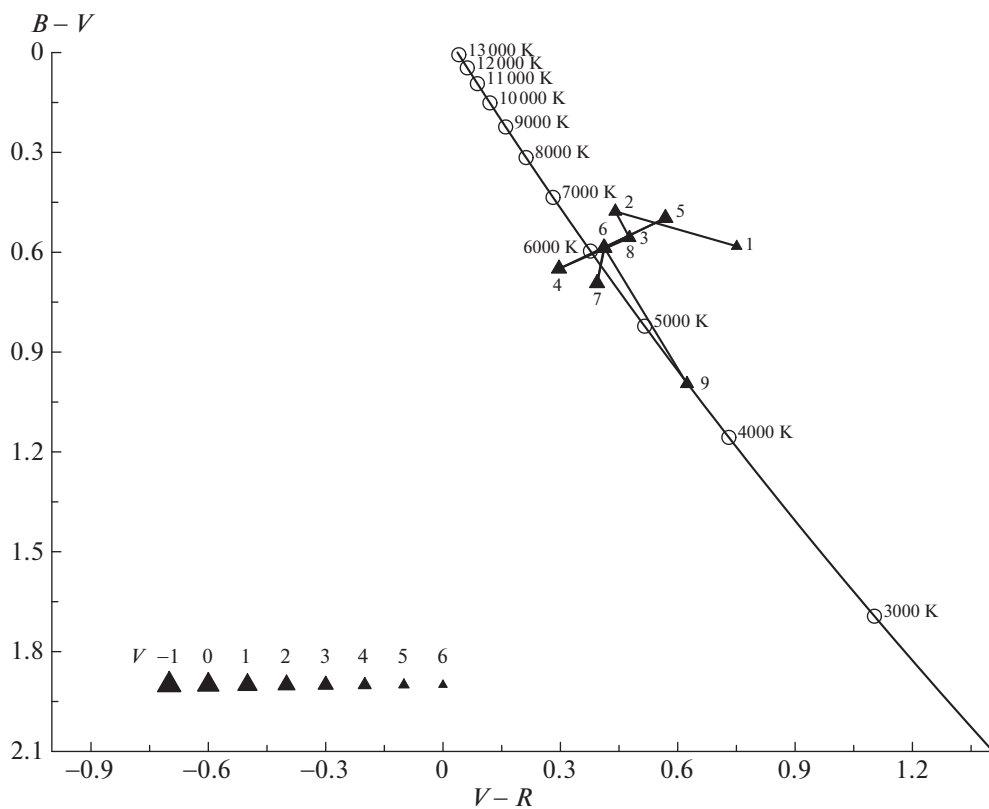


Рис. 16. Двухцветная диаграмма для метеора № 41 (STA).

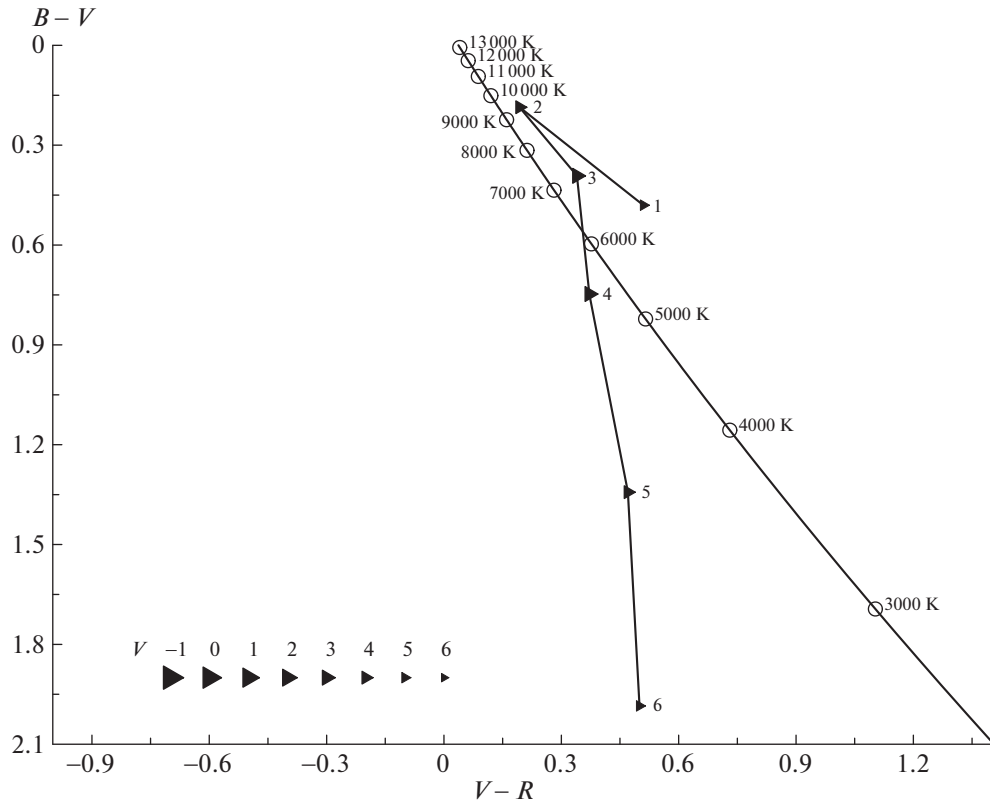


Рис. 17. Двухцветная диаграмма для метеора № 49 (GEM).

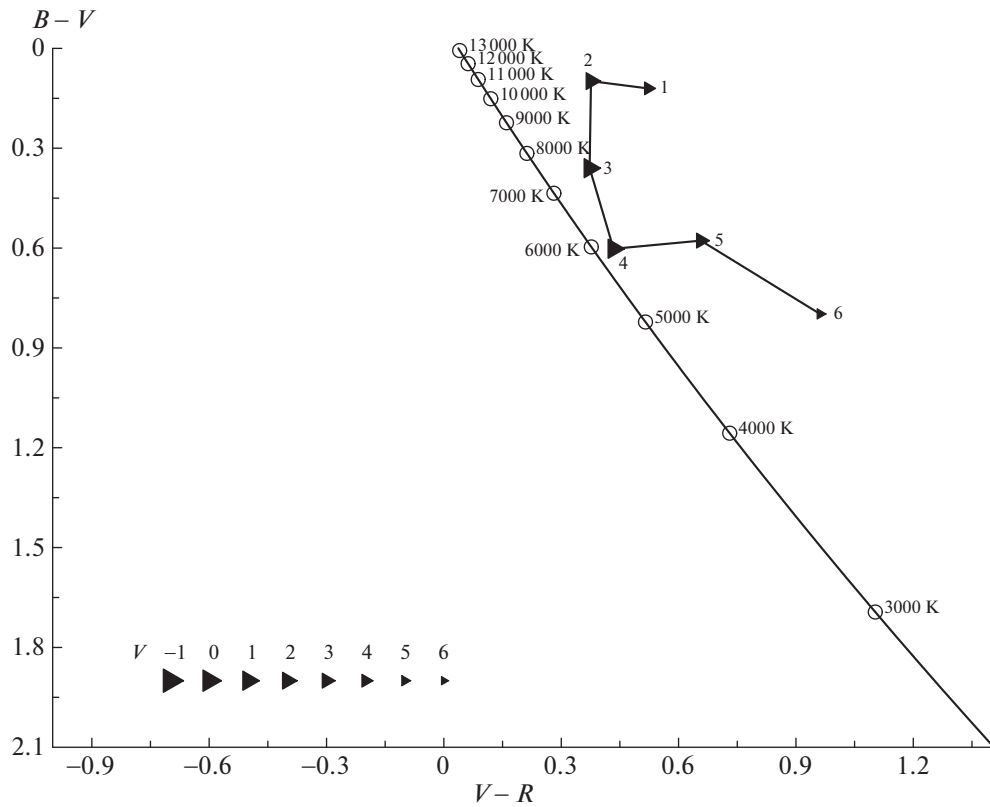


Рис. 18. Двухцветная диаграмма для метеора № 53 (GEM).

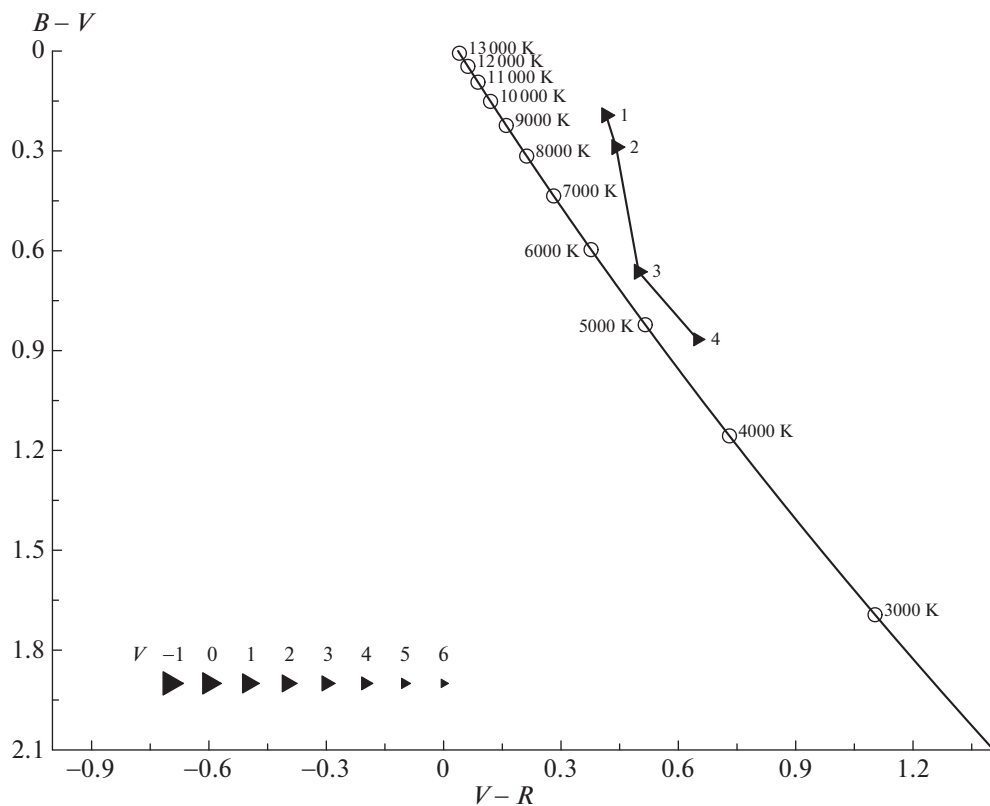


Рис. 19. Двухцветная диаграмма для метеора № 45 (GEM).

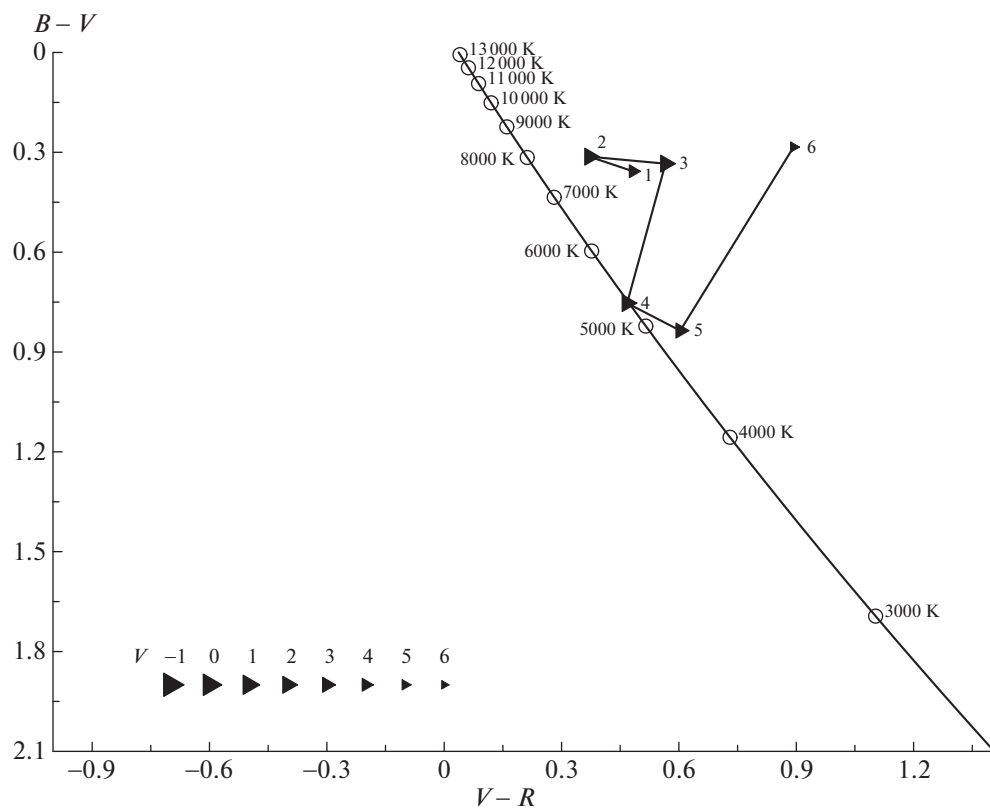


Рис. 20. Двухцветная диаграмма для метеора № 57 (GEM).

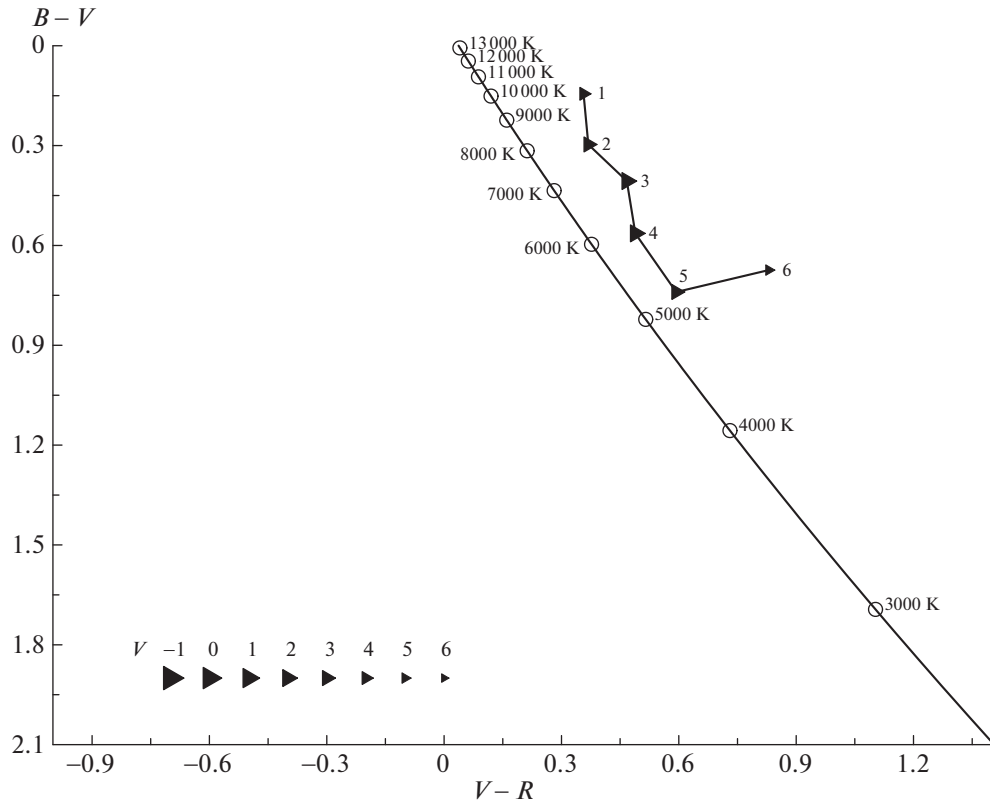


Рис. 21. Двухцветная диаграмма для метеора № 48 (GEM).

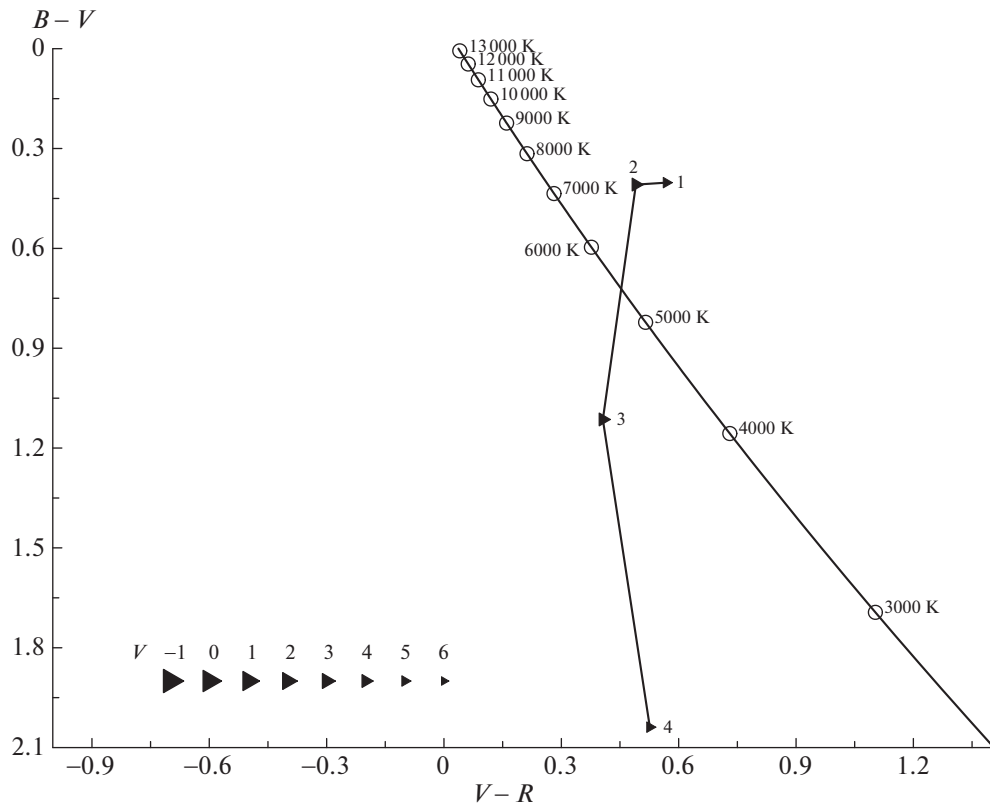


Рис. 22. Двухцветная диаграмма для метеора № 43 (GEM).

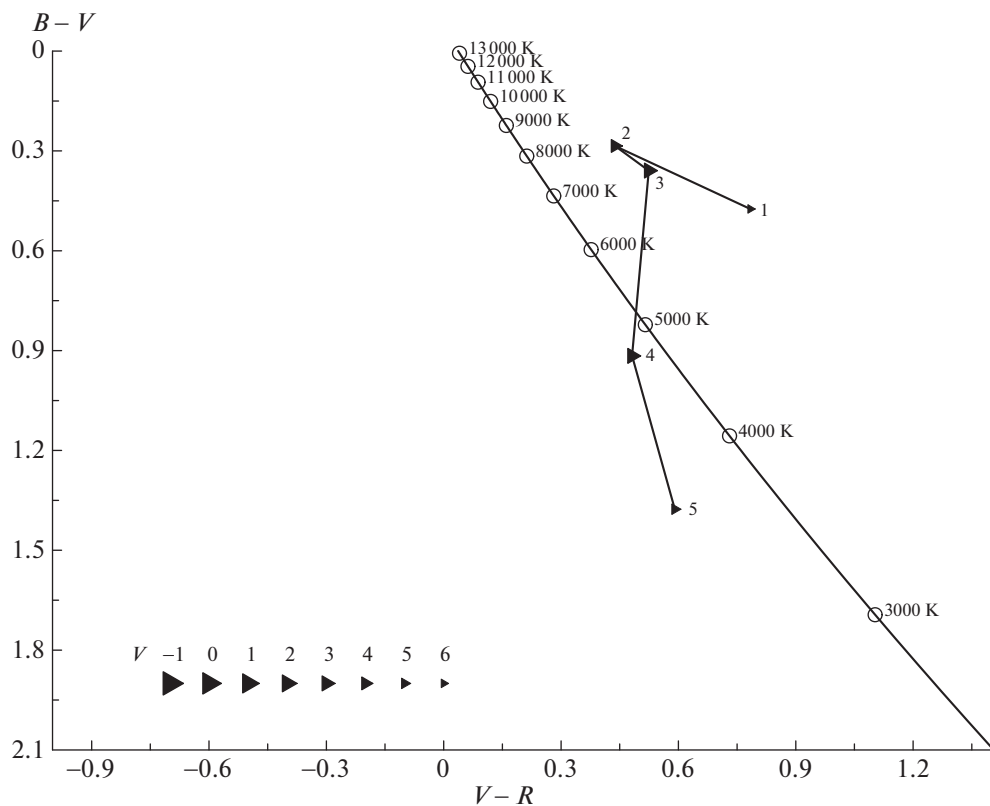


Рис. 23. Двухцветная диаграмма для метеора № 50 (GEM).

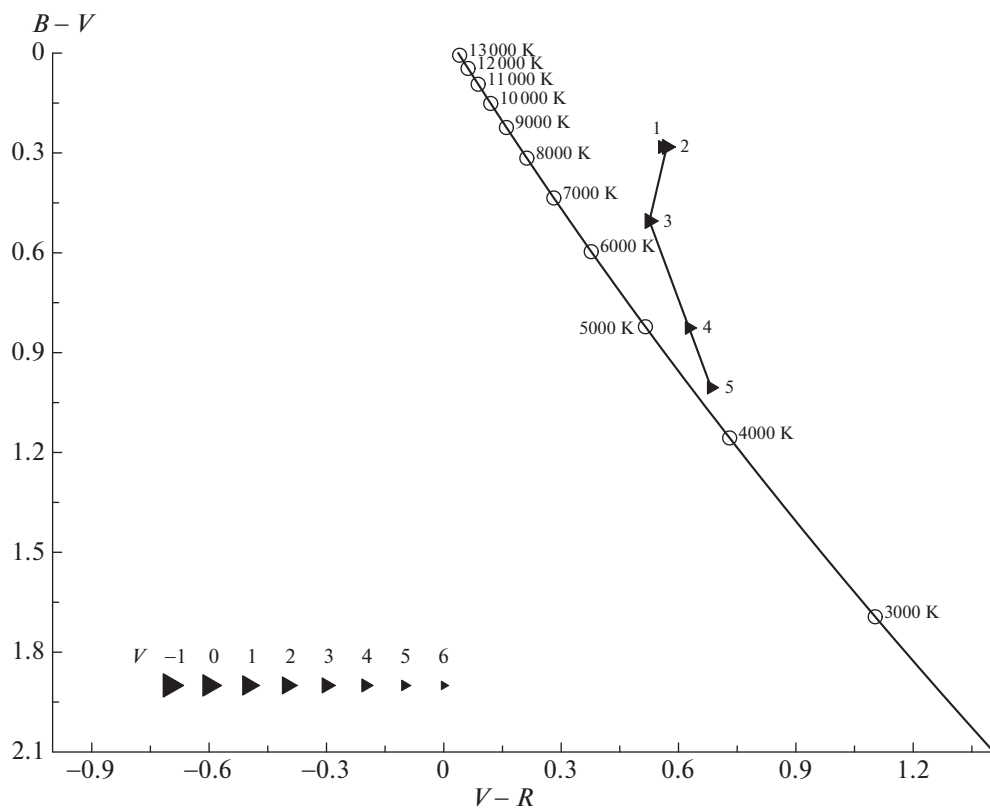


Рис. 24. Двухцветная диаграмма для метеора № 61 (GEM).

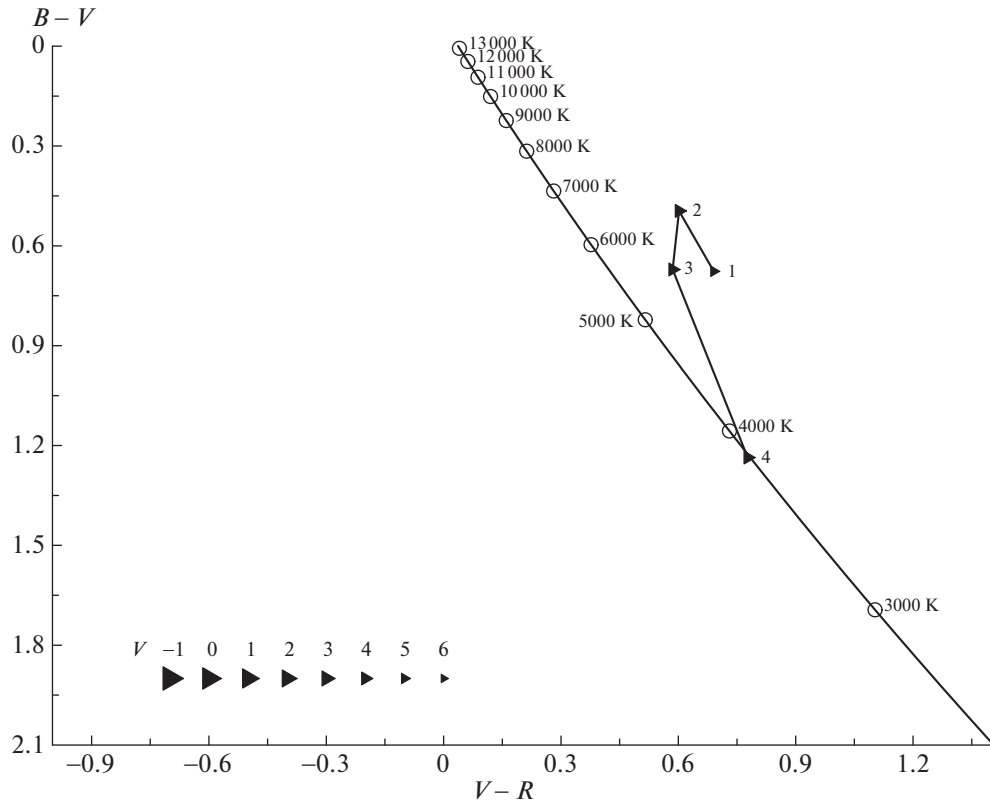


Рис. 25. Двухцветная диаграмма для метеора № 58 (GEM).

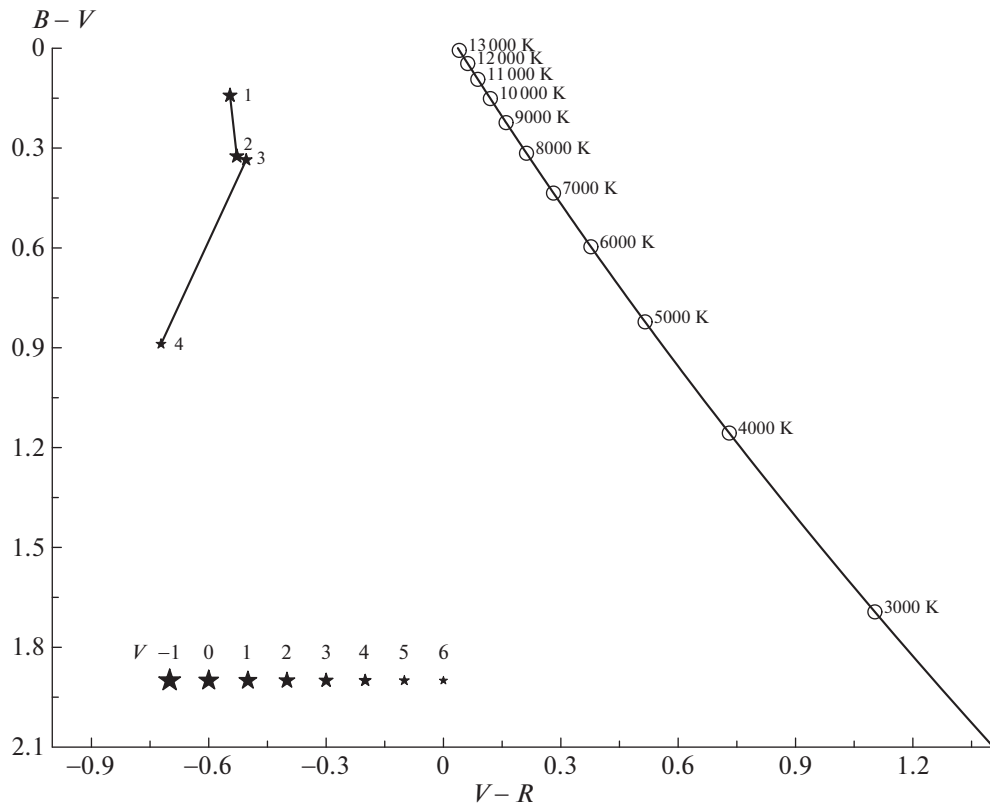


Рис. 26. Двухцветная диаграмма для метеора № 66 (LYR).

трального атомарного кислорода с длиной волны 5577 Å [52].

Ни один из наблюдавшихся метеоров потока Геминид (рис. 17–25) не имеет самопересечений трека на двухцветной диаграмме, тогда как у Таурид (рис. 14–16) такие самопересечения присутствуют.

Треки спорадических метеоров на двухцветной диаграмме (рис. 3–12) имеют самые разнообразные формы. Для метеоров № 6 (рис. 10) и № 3 (рис. 11) можно найти аналоги среди Геминид — соответственно № 49, 43, 50 (рис. 17, 22, 23) и № 58 (рис. 25) — но оба они наблюдались в августе, что полностью исключает их принадлежность к Геминидам, которые действуют только в декабре.

Учитывая, что количество наблюдавшихся метеоров в каждой группе невелико, эти выводы пока можно рассматривать лишь как предварительные.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

BVR-наблюдения, проведенные с системой Мини-МегаТОРТОРА по нашей заявке, и применение метода двухцветных диаграмм дают возможность сделать вывод о том, что основным фактором, определяющим цвет наблюдавшихся метеоров потоков Персеид, Таурид, Геминид в видимом диапазоне, является их принадлежность к данным потокам. Зависимость цвета от звездной величины, ошибки измерений, включая неточность определения максимума блеска, не рассеяли скопления, объединяемые на двухцветной диаграмме потоками. Сравнение с тройной диаграммой Na–Mg–Fe показывает, что цветовая классификация метеоров не повторяет современную спектральную классификацию.

Тем не менее конкретная форма зависимости цвета от динамических характеристик потока остается пока неопределенной. Для уточнения характера этой зависимости планируется проведение дополнительных исследований. *BVR*-наблюдения тех же и других главных и малых метеорных потоков, для которых известны средние орбиты, позволят выяснить, какие именно динамические параметры потоков дают схожий цвет, а какие обуславливают их цветовое различие. Одновременное выполнение базисных наблюдений (проводятся на ММТ-9 в экспериментальном режиме) с *BVR*-наблюдениями позволит определить элементы орбит спорадических метеоров и исследовать, какие элементы объединяют метеоры того или иного потока со спорадическими, расположенными в одной области двухцветной диаграммы. Вычисление синтетических показателей цвета по известным из литературы спектрам метеоров позволит сопоставить цветовую классификацию со спектральной, выделить эмиссионные линии химических элементов, дающие наибольший вклад в видимый цвет.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа частично выполнена за счет средств субсидии 3.6714.2017/8.9, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения научного задания в сфере научной деятельности.

Работа частично выполнена при поддержке программы повышения конкурентоспособности Казанского федерального университета и Российского фонда фундаментальных исследований 18-32-00895 мол_а.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Г.М. Бескину, С.В. Карпову (Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук, Казанский (Приволжский) федеральный университет (КФУ)), А.В. Бирюкову (Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга Московского государственного университета, КФУ), С.Ф. Бондарю, Е.А. Иванову, Е.В. Катковой, Н.В. Ореховой, А.В. Перкову (Филиал “Станция оптических наблюдений Архыз” Научно-производственной корпорации “Системы прецизионного приборостроения”), В.В. Сасюку (Компания “Параллакс”, КФУ) за организацию и проведение наблюдений, первичную обработку данных, создание и ведение каталога наблюдений, а также полезное обсуждение результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. Sansom, J. Ridgewell, P. Bland, and J. Paxman, in *Proc. of the International Meteor Conference, Egmond, the Netherlands, 2016*, edited by A. Roggemans and P. Roggemans, p. 267 (2016).
2. M. Beech, *Quart. J. Roy. Astron. Soc.* **28**, 445 (1987).
3. G. Wu and Z. Zhang, *Chin. Astron. and Astrophys.* **27**, 435 (2003).
4. A. McBeath, *WGN, J. IMO* **18**, 114 (1990).
5. A. McBeath, *WGN, J. IMO* **19**, 198 (1991).
6. G. Zay, *WGN, J. IMO* **21**, 268 (1993).
7. A. Olech and P. Woźniak, *Earth, Moon and Planets* **73**, 157 (1996).
8. L. G. Jacchia, *Astron. J.* **62**, 358 (1957).
9. Z. Ceplecha, *Bull. Astron. Inst. Czechoslovakia* **10**, 39 (1959).
10. J. Davis, *Smith. Contr. Astroph.* **7**, 233 (1963).
11. J. Davis, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **126**, 445 (1963).
12. L. Kohoutek, *Bull. Astron. Inst. Czechoslovakia* **14**, 172 (1963).
13. Z. Ceplecha, J. Grygar, and L. Kohoutek, *Bull. Astron. Inst. Czechoslovakia* **16**, 123 (1965).
14. M. Hajduková, *Bull. Astron. Inst. Czechoslovakia* **18**, 187 (1967).

15. M. Hajduková, Bull. Astron. Inst. Czechoslovakia **23**, 350 (1972).
16. M. Hajduková, Bull. Astron. Inst. Czechoslovakia **24**, 229 (1973).
17. J. Štohl and M. Hajduková, Bull. Astron. Inst. Czechoslovakia **30**, 13 (1979).
18. U. Sperberg, WGN, J. IMO **18**, 111 (1990).
19. F. Ocaña, J. Zamorano, and J. Gallego, in *Proc. of the International Meteor Conference, Sibiu, Romania, 2011*, edited by M. Gyssens and P. Roggemans, p. 48 (2012).
20. M. Hajduková, Bull. Astron. Inst. Czechoslovakia **25**, 365 (1974).
21. P. M. Millman, Ann. Harvard College Observ. **82**, 149 (1935).
22. P. M. Millman, Smith. Contr. Astroph. **7**, 119 (1963).
23. J. Borovička, Planetary and Space Science **42**, 145 (1994).
24. J. Borovička, P. Koten, P. Spurný, J. Boček, and R. Štokr, Icarus **174**, 15 (2005).
25. P. M. Millman, Ann. Harvard College Observ. **82**, 113 (1932).
26. J. Borovička, in *Proc. of the International Meteor Conference, Egmond, the Netherlands, 2016*, edited by A. Roggemans and P. Roggemans, p. 34 (2016).
27. V. Vojáček, J. Borovička, P. Koten, P. Spurný, and R. Štokr, in *Proc. of the International Meteor Conference, Egmond, the Netherlands, 2016*, edited by A. Roggemans and P. Roggemans, p. 333 (2016).
28. A. Drouard, P. Vernazza, S. Loehle, J. Gattacceca, et al., Astron. and Astrophys. **613**, id. A54 (2018).
29. H. L. Johnson and W. W. Morgan, Astrophys. J. **117**, 313 (1953).
30. I. Groeneveld and G. P. Kuiper, Astrophys. J. **120**, 529 (1954).
31. J. K. Davies, D. J. Tholen, and D. R. Ballantyne, ASP Conf. Ser. **107**, 97 (1996).
32. J. Luu and D. Jewitt, Astron. J. **112**, 2310 (1996).
33. D. Jewitt, Astron. J. **150**, id. 201 (2015).
34. T. Cardona, P. Seitzer, A. Rossi, F. Piergentili, and F. Santoni, Adv. Space Res. **58**, 514 (2016).
35. W. Park, S. Pak, H. Shim, H. A. N. Le, M. Im, S. Chang, and J. Yu, Adv. Space Res. **57**, 509 (2016).
36. A. Biryukov, G. Beskin, S. Karpov, S. Bondar, E. Ivanov, E. Katkova, A. Perkov, and V. Sasyuk, Baltic Astronomy **24**, 100 (2015).
37. M. S. Bessell, Publ. Astron. Soc. Pacific **102**, 1181 (1990).
38. A. Zakharov, A. Mironov, A. Biryukov, N. Kroussanova, et al., Acta Astronomica **65**, 197 (2015).
39. S. Karpov, G. Beskin, A. Biryukov, S. Bondar, E. Ivanov, E. Katkova, A. Perkov, and V. Sasyuk, Revista Mexicana Astron. Astrof. (Ser. Conferencias) **48**, 91 (2016).
40. S. Karpov, N. Orekhova, G. Beskin, A. Biryukov, et al., Revista Mexicana Astron. Astrof. (Ser. Conferencias) **48**, 97 (2016).
41. Z. Ceplecha, Bull. Astron. Inst. Czechoslovakia **8**, 51 (1957).
42. F. L. Whipple and L. G. Jacchia, Smith. Contr. Astroph. **1**, 183 (1957).
43. D. E. B. Fleming, R. L. Hawkes, and J. Jones, in *Meteoroids and Their Parent Bodies. Proc. of the International Astronomical Symposium, Smolenice, Slovakia, 1992*, edited by J. Štohl and I. P. Williams, p. 261 (1993).
44. В. А. Леонов, Астрон. вестн. **44**, 135 (2010).
45. P. Jenniskens, Q. Nénon, J. Albers, P. S. Gural, et al., Icarus **266**, 331 (2016).
46. J. D. Giorgini, D. K. Yeomans, A. B. Chamberlin, P. W. Chodas, et al., Bull. Amer. Astron. Soc. **28**, 1158 (1996).
47. C. Tubiana, C. Snodgrass, R. Michelsen, H. Haack, H. Bönhardt, A. Fitzsimmons, and I. P. Williams, Astron. and Astrophys. **584**, id. A97 (2015).
48. D. Jewitt and J. Li, Astron. J. **140**, 1519 (2010).
49. G. O. Ryabova, in *European Planetary Science Congress, 2008, Abstracts*, id. A-00226 (2008).
50. C. Rodrigo, A. Bayo, E. Solano, and D. Barrado y Navascués, ASP Conf. Ser. **485**, 321 (2014).
51. M. S. Bessell, F. Castelli, and B. Plez, Astron. and Astrophys. **333**, 231 (1998).
52. I. Halliday, Astrophys. J. **131**, 25 (1960).