



ПРАКТИЧЕСКИЙ ТУР



9 класс

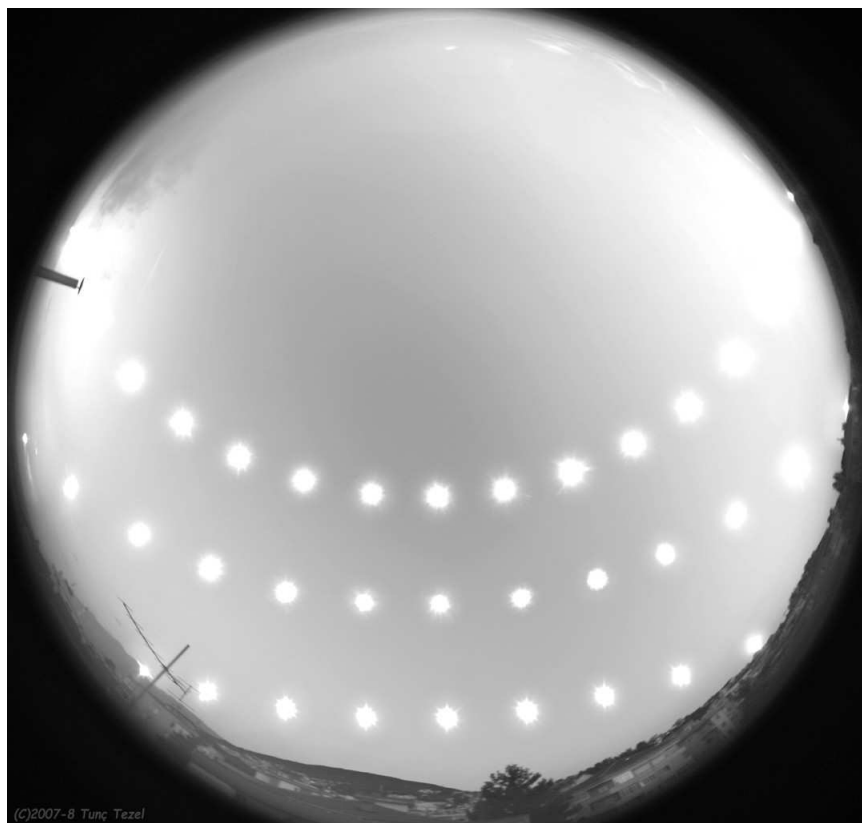


IX. 1

СОЛНЕЧНЫЕ ЦЕПОЧКИ

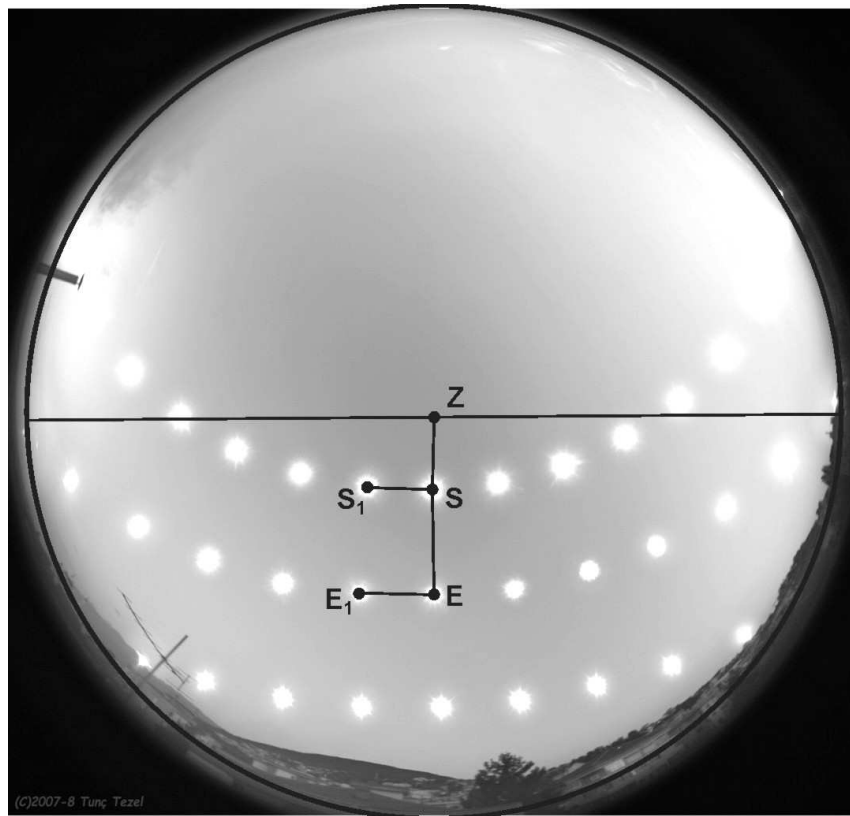
О.С. Угольников

? В некотором пункте в северном полушарии Земли производилась съемка неба с Солнцем раз в час в день равноденствия и дни солнцестояний. Получилась предложенная Вам фотография. Масштаб фотографии искажается при удалении от зенита. Определите широту пункта съемки.



! Фотография сделана в северном полушарии, во всех трех случаях (оба солнцестояния и равноденствие) верхняя кульминация Солнца происходила с одной (южной) стороны от зенита. Следовательно, наблюдения проводились на широте, большей $+23.4^\circ$. Расстояния между полуденными положениями Солнца в равноденствие и оба солнцестояния различаются, это следствие искажения масштаба фотографии при удалении от зенита.

Определить масштаб фотографии вблизи зенита можно несколькими способами, причем точность будет тем лучше, чем ближе к зениту берется «стандарт-



ный» отрезок, соответствующий известной угловой длине. Очевидно, что нижний трек Солнца (зимнее солнцестояние), лежащий у горизонта, использовать нельзя. Можно определить масштаб фото по отрезку SE , равному углу наклона экватора к эклиптике ε (23.4°) и по отрезку E_1E – часовому перемещению Солнца по небу в день равноденствия (15°), это не приведет к ошибке определения широты более $1-2^\circ$.

Наилучший способ определить масштаб – измерить длину отрезка S_1S , соответствующего часовому перемещению Солнца в день солнцестояния ($15^\circ \cos \varepsilon = 13.8^\circ$). Этот отрезок находится ближе всего к зениту. Длина отрезка ZS на фотографии составляет 1.1 от длины отрезка S_1S , зенитное расстояние Солнца в день летнего солнцестояния z равно 15° . Широта места равна

$$\varphi = \varepsilon + z \sim 38^\circ.$$

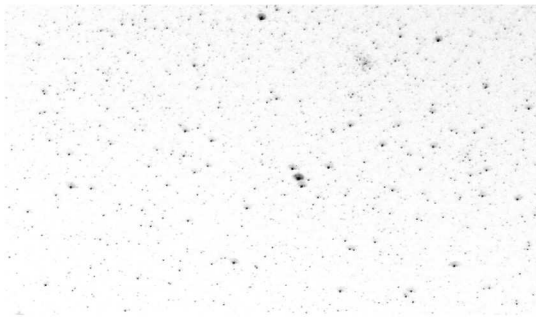
IX. 2

МЕТЕОРНОЕ ВЕЩЕСТВО

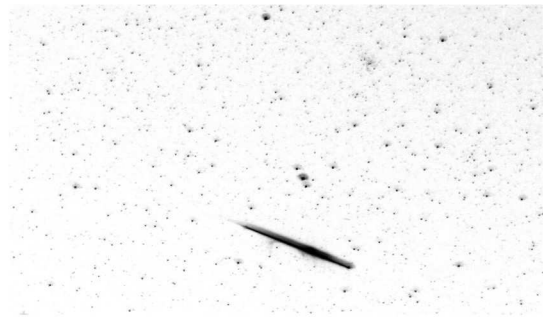
А.М. Татарников

? Перед Вами фотографии одной и той же области неба, полученные последовательно с интервалом 30 секунд (автор – С.А. Короткий). На них виден яркий болид из потока Геминиды и разлетающееся после него вещество. Оцените скорость разлета вещества. Метеор наблюдался на высоте 40° над горизонтом и имел блеск -3^m . При решении задачи вы можете воспользоваться прилагаемой звездной картой этой области неба.

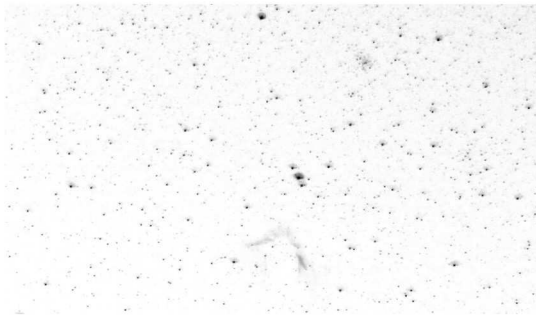
Практический тур – 9 класс



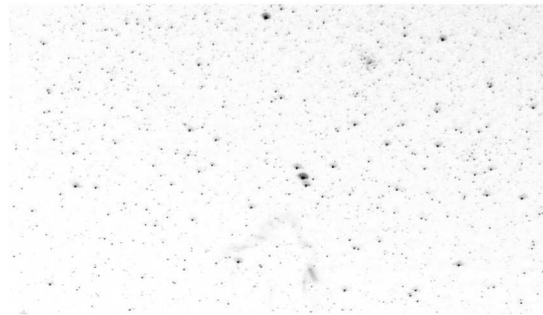
1



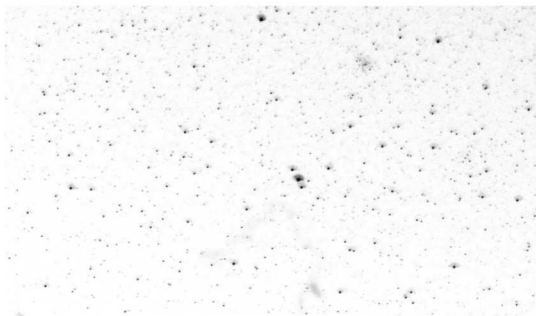
2



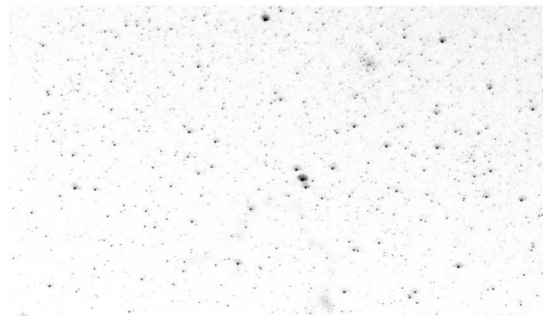
3



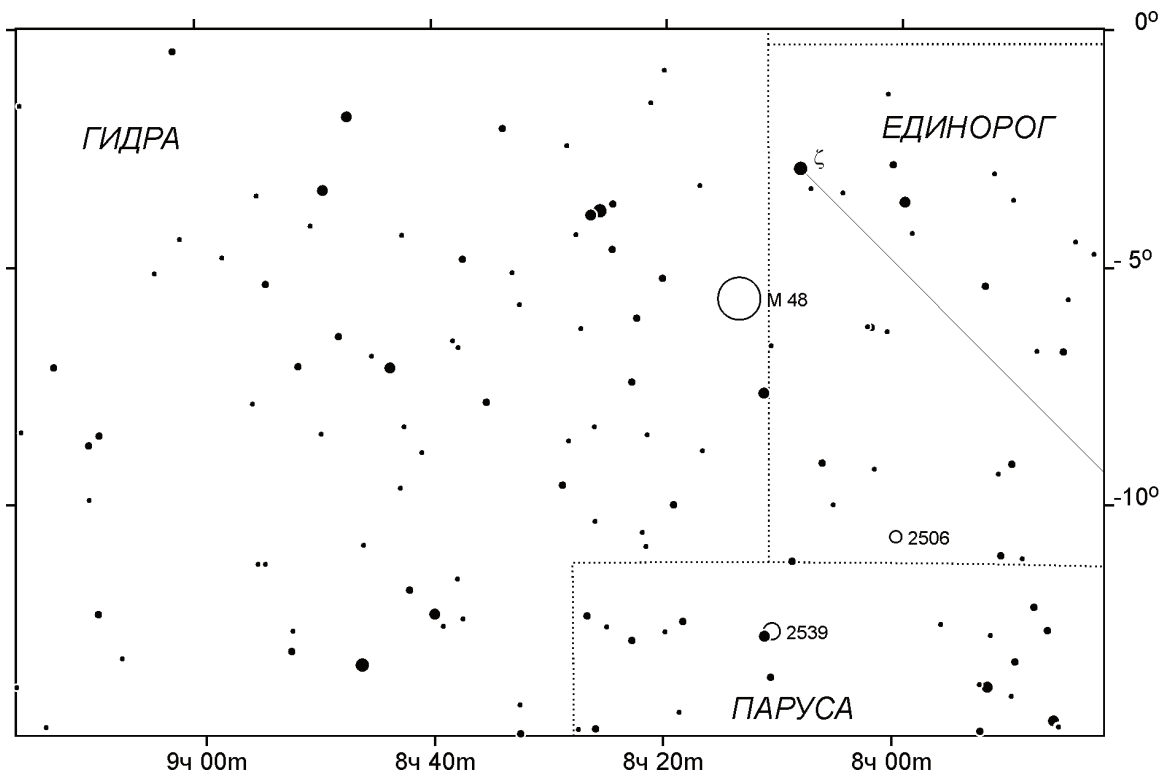
4



5



6



XX Всероссийская олимпиада школьников по астрономии

! Указанную область неба достаточно легко отождествить по звездной карте, используя яркие звезды созвездий Единорога и Гидры и рассеянное звездное скопление М48, также указанное на карте.

По кадрам 3-6 можно определить центр разлета вещества. Для нахождения скорости возьмем последний кадр и выделим фрагменты свечения, максимально удаленные от центра. Будем считать, что именно эти фрагменты вылетали перпендикулярно лучу зрения. Проведем через них окружность с центром, совпадающим с точкой вылета вещества. По координатной сетке карты можно определить радиус этой окружности на небе r , он равен 2° .

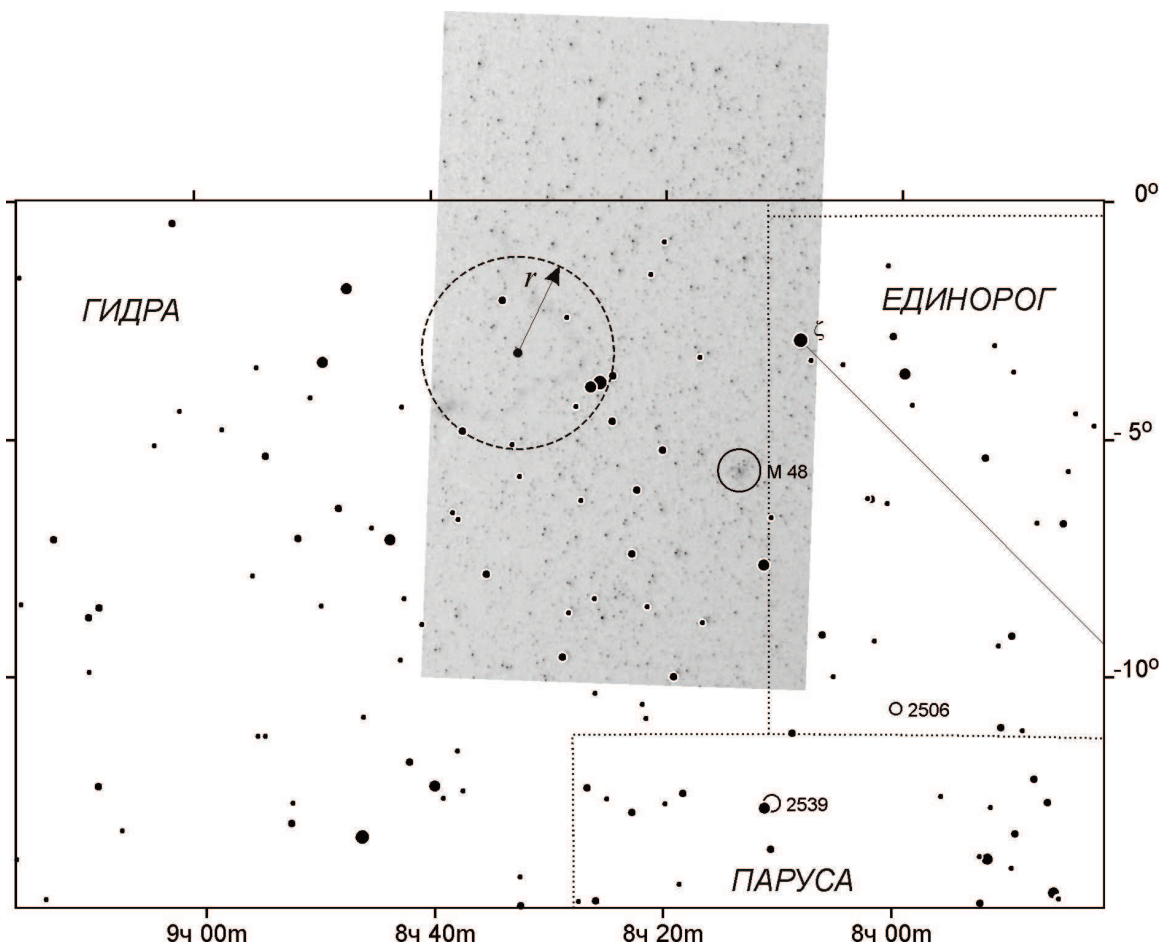
Далее нам нужно определить расстояние до точки вылета. Высоты метеоров H составляют порядка 100 км. Расстояние равно

$$L = H / \cos h = 130 \text{ км.}$$

Здесь h – высота метеора над горизонтом. Переводя радиус r в радианную меру, оцениваем скорость разлета вещества:

$$v = L r / T.$$

Здесь T – время между полетом метеора и последней экспозицией (120 секунд). Скорость составляет 40 м/с.

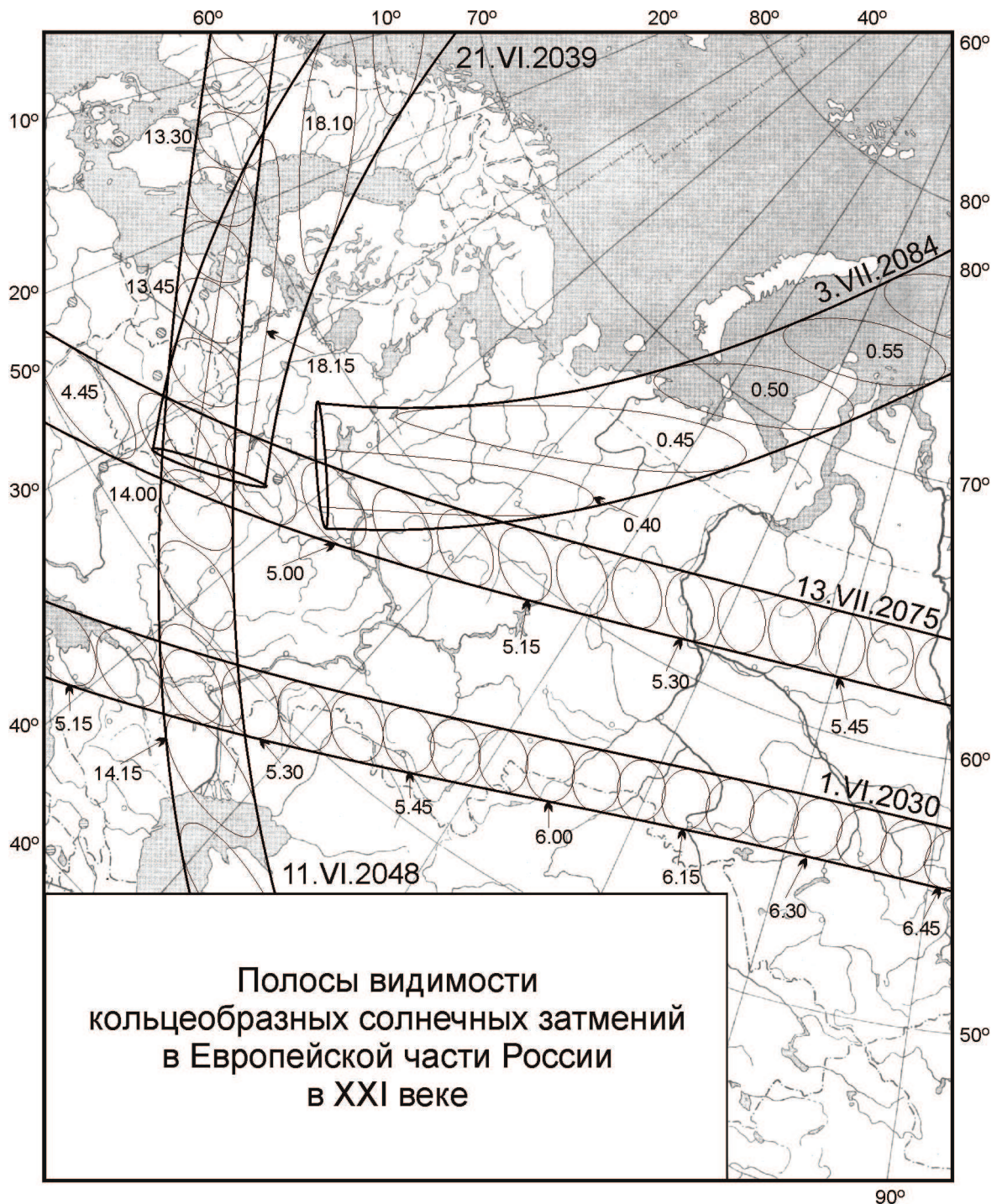


IX. 3

ПЯТЬ КОЛЕЦ

А.Н. Акинъчиков

? Перед вами карта кольцеобразных солнечных затмений, которые будут видны в Европейской части России в XXI веке. Для каждого затмения показана полоса кольцеобразной фазы и область видимости кольцеобразного затмения через каждые 5 минут. Моменты указаны по Всемирному времени. Для каждого из городов России, принимавших Всероссийскую олимпиаду по астрономии в 1994-2013 годах (координаты в таблице), укажите все затмения, которые там будут видны как кольцеобразные. Определите (с точностью до минуты по Всемирному времени) моменты начала, середины и конца кольцеобразной фазы.



XX Всероссийская олимпиада школьников по астрономии

Для каждого города можно сделать вывод, попал ли он в полосу видимости того или иного кольцеобразного затмения. Если кольцеобразная фаза видна в указанном городе, то его положение нужно сопоставить с кружками, соответствующими области видимости кольцеобразной фазы через каждые 5 минут. Кружки в двух точках касаются края самой полосы, эти две точки разделяют кружки на дуги, соответствующие началу и окончанию кольцеобразной фазы. При определении длительности кольцеобразной фазы можно обратить внимание, что она составляет ровно 5 минут, если соседние кружки касаются друг друга, и меньше 5 минут, если кружки не пересекают друг друга.

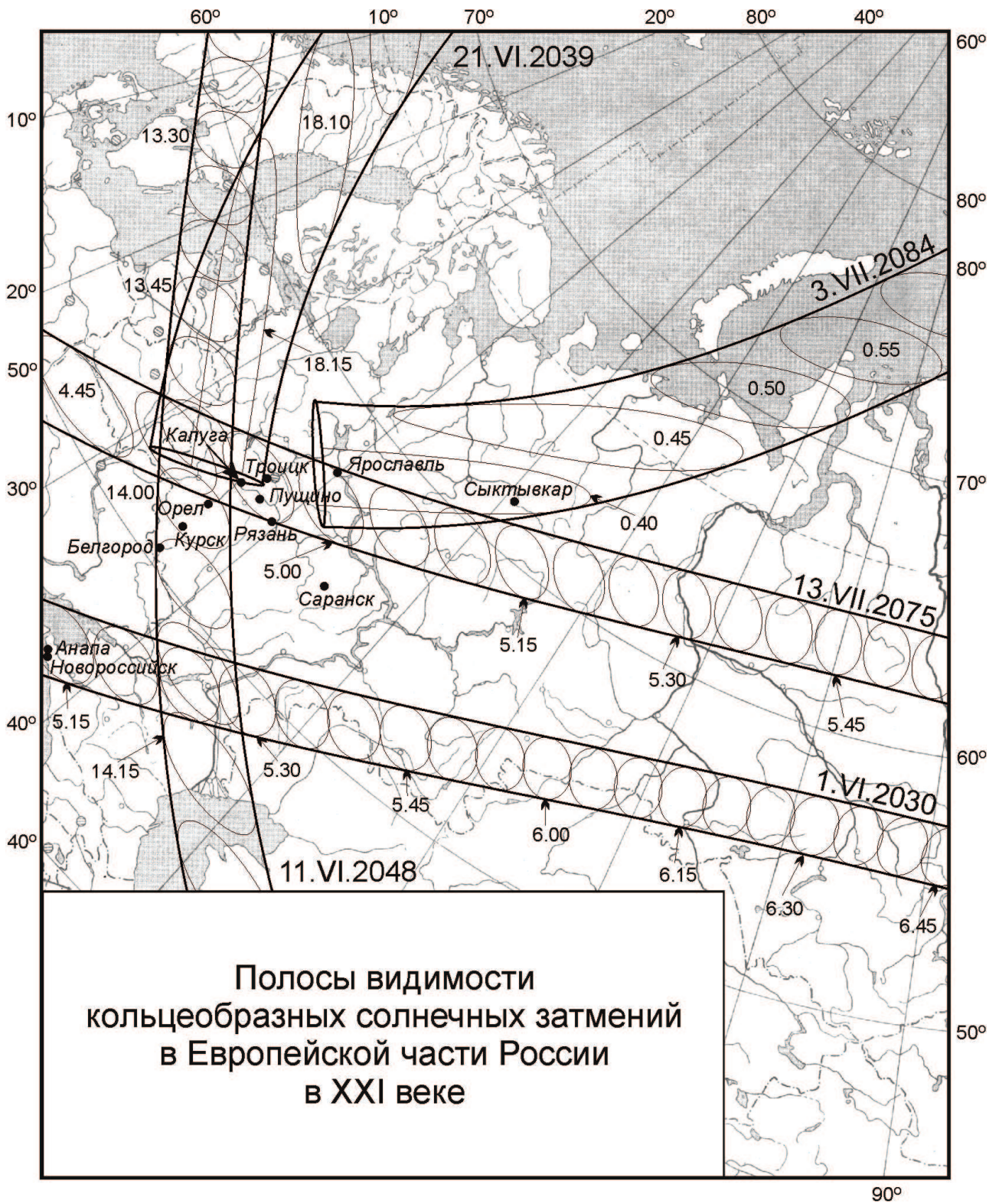
Город	Широта		Долгота	
	°	'	°	'
Ярославль	57	37	39	53
Рязань	54	37	39	42
Калуга	54	32	36	17
Троицк	55	29	37	19
Белгород	50	36	36	35
Сыктывкар	61	40	50	49
Курск	51	43	36	12
Пушино	54	50	37	37
Саранск	54	11	45	11
Новороссийск	44	44	37	46
Анапа	44	54	37	19
Орел	52	58	36	05

Особенного внимания требуют участки окончания кольцеобразного затмения 21 июня 2039 года и начала кольцеобразного затмения 3 июля 2084 года, когда затмение наблюдается на горизонте. Условия видимости кольцеобразных затмений в указанных городах приведены в таблице:

Город	Дата затмения	Начало		Середина		Окончание	
		ч	м	ч	м	ч	м
Ярославль	13 июля 2075	05	00	05	01	05	02
	3 июля 2084	00	39	00	40	00	41
Рязань	13 июля 2075	04	55	04	55	04	55
Калуга	21 июня 2039*	18	15				
	13 июля 2075	04	52	04	54	04	56
Троицк	13 июля 2075	04	54	04	56	04	58
Белгород	11 июня 2048	14	03	14	04	14	05
Сыктывкар	3 июля 2084	00	39	00	40	00	41
Курск	11 июня 2048	13	59	14	01	14	03
Пушино	13 июля 2075	04	53	04	55	04	57
Саранск	—						
Новороссийск	1 июня 2030	05	12	05	14	05	16
Анапа	1 июня 2030	05	12	05	14	05	17
Орел	11 июня 2048	13	57	13	59	14	01

* Видно только начало кольцеобразного затмения на самом заходе Солнца.

Практический тур – 9 класс





X. 1

МОРСКОЙ ОСЕННИЙ ЗАКАТ

О.С. Угольников

? Сентябрьским вечером в некоторой точке на берегу моря с широтой $+46^\circ$ наблюдался заход Солнца точно за далекой косой (фото). На следующий вечер такая же картина наблюдалась в другой точке набережной, удаленной от первой на 46 метров. Считая направление на запад перпендикулярным берегу, найдите расстояние до косы.



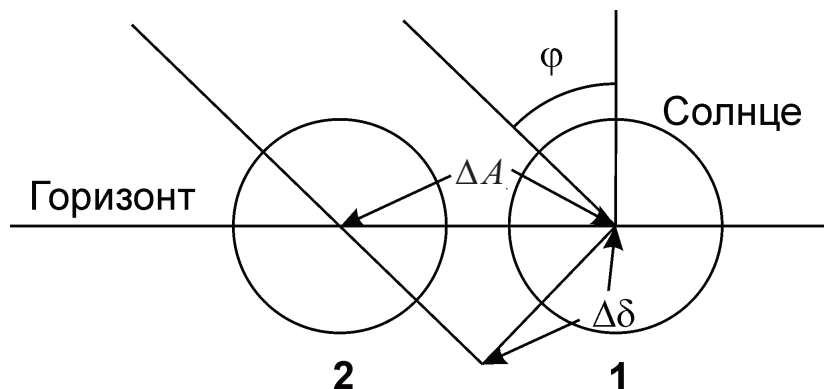
! За один день Солнце перемещается по эклипке на угол γ , равный $(360/365.25) = 0.986^\circ$. В сентябре, вблизи осеннего равноденствия, это движение происходит под углом ε (23.4°) к экватору. Склонение Солнца за один день уменьшится на величину

$$\Delta\delta = \gamma \sin \varepsilon = 0.39^\circ.$$

Рассмотрим положение Солнца в момент захода в два последующих вечера. Разница азимутов точек захода центра диска Солнца равна

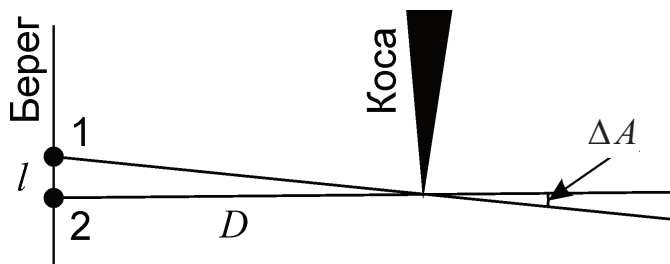
$$\Delta A = \frac{\Delta\delta}{\cos\varphi} = \frac{\gamma \sin\varepsilon}{\cos\varphi} = 0.56^\circ.$$

Здесь φ – широта места наблюдения. Атмосферная рефракция не изменяет картину, так как она в равной степени поднимает изображения Солнца над горизонтом. Рассмотрим положение косы и двух точек на берегу, из которых наблюдался заход Солнца за косой.



Так как угол ΔA мал, выражаем его в радианной мере и определяем расстояние до косы по формуле:

$$D = \frac{l}{\Delta A} = \frac{l \cos \varphi}{\gamma \sin \varepsilon} = 4.7 \text{ км.}$$

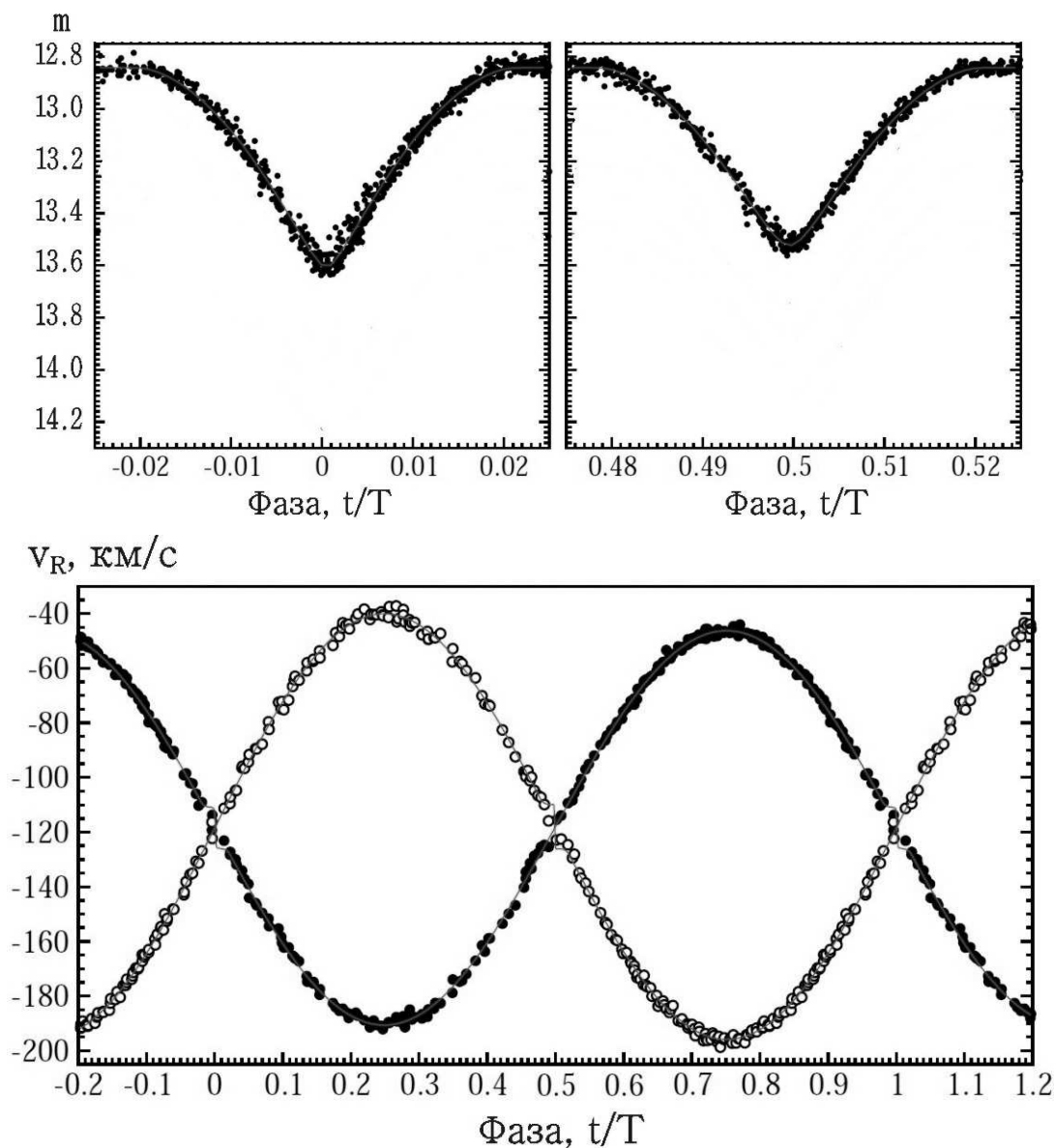


X. 2

ЗВЕЗДНЫЙ ВАЛЬС

О.С. УГОЛЬНИКОВ

? На графиках приведены кривые блеска (вблизи минимумов) и кривая лучевых скоростей компонент затменной двойной системы CM Дракона. Орбитальный период системы составляет 1.27 дня. По оси абсцисс отложена величина фазы (время, деленное на период). Считая звезды сферическими, определите величины их средней плотности.



Обратим внимание на несколько свойств системы СМ Дракона, существенно облегчающих решение задачи. Минимумы блеска наступают при фазах 0 и 0.5, то есть ровно через половину орбитального периода системы. В эти же моменты лучевые скорости звезд совпадают, как видно из соответствующего графика. Это может быть, если орбиты звезд круговые или эллиптические с линией апсид, перпендикулярной плоскости наблюдения (то есть проходящей через наблюдателя). Во втором из этих случаев уменьшение блеска во время первого и второго минимума имело бы разную длительность, а кривые лучевых скоростей выглядели бы асимметрично, чего не наблюдается. Итак, орбиты звезд круговые. По кривым блеска видно, что главный и вторичный минимумы имеют также практически одинаковую глубину и составляют около 0.7^m , то есть видимая яркость системы уменьшается в 2 раза. Следовательно, затмения в системе практически полные, а входящие в систему звезды – почти одинаковые, иначе глубина, по крайней мере, одного минимума была бы меньше 0.7^m . Понятно также, что наблюдатель находится в плоскости орбит звезд.

Вид кривых лучевой скорости системы указывает, что массы звезд также одинаковы с точностью до 10%, их орбиты фактически совпадают. Орбитальная скорость звезд v есть амплитуда синусоидальных колебаний лучевой скорости, она составляет 75 км/с. Зная орбитальный период системы T , получаем величину радиуса орбит звезд:

$$R = vT/2\pi.$$

Радиус составляет всего 1.3 млн км, что меньше 0.01 а.е. Запишем уравнение закона всемирного тяготения для этих звезд:

$$\frac{GM^2}{4R^2} = \frac{Mv^2}{R}.$$

Здесь M – масса каждой из звезд. Она равна

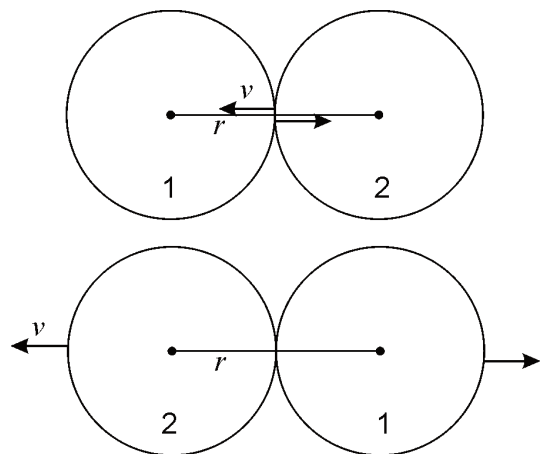
$$M = \frac{4v^2 R}{G} = \frac{2v^3 T}{\pi G}.$$

Численное значение массы составляет $4.4 \cdot 10^{29}$ кг или 0.22 массы Солнца. По кривой блеска видим, что его длительность обоих минимумов t составляет 0.04 от орбитального периода T . Во время минимумов звезды движутся на небе навстречу друг другу, в начале и конце затмения их диски касаются друг друга. Длительность затмения составляет

$$t = 4r/2v = 2r/v.$$

Отсюда мы получаем, что радиус каждой из звезд r равен $vt/2$ или 150 тысяч км (0.22 радиуса Солнца). Средняя плотность звезд равна

$$\rho = \frac{3M}{4\pi r^3} = 3 \cdot 10^4 \text{ кг/м}^3.$$



Х. 3

РОССИЙСКО-БЕЛОРУССКАЯ КОМЕТА

О.С. Угольников

? 21 сентября 2012 года Виталий Невский (Белоруссия) и Артем Новичонок (Россия) с помощью 40-см рефлектора Международной научной оптической сети (International Scientific Optical Network, ISON) рядом с Кисловодском открыли новую комету, получившую обозначение C/2012 S1 (ISON). Комета была также найдена на более ранних снимках декабря 2011 и января 2012 года. В таблице даны измеренные значения блеска кометы в различные моменты времени (усредненные по нескольким наблюдениям) в течение одного года, а также расстояния до Земли и Солнца в это время. Считая, что зависимость светимости кометы от расстояния до Солнца r близка к r^{-4} , оцените ее блеск в день перигелия 28 ноября 2013 года, когда она окажется в 0.0125 а.е. от Солнца. Какой максимальный блеск может иметь эта комета при наблюдении на темном небе до и после перигелия (погружение Солнца под горизонт более 18°)?

Дата	Расстояние от Земли, d	Расстояние от Солнца, r	Блеск, m
	а.е.	а.е.	
28 декабря 2011	7.738	8.673	19.7
21 января 2012	7.491	8.415	20.2
21 сентября 2012	6.732	6.288	18.2
1 октября 2012	6.479	6.191	17.8
27 октября 2012	5.810	5.940	17.1
3 ноября 2012	5.622	5.870	16.9
1 декабря 2012	4.911	5.585	16.4
8 декабря 2012	4.753	5.513	16.3
4 января 2013	4.256	5.219	15.6

! Яркость кометы при наблюдении с Земли выражается формулой:

$$J = J_0 d^{-2} r^{-4},$$

где J_0 – некоторая постоянная или медленно меняющаяся величина, определяемая физическими свойствами кометы, d – расстояние от кометы до Земли, r – расстояние от кометы до Солнца (оба расстояния выражены в астрономических единицах). Применяя формулу Погсона, получаем выражение для звездной величины кометы:

$$m = m_0 + 10 \lg r + 5 \lg d.$$

Здесь m_0 – величина, называемая абсолютной звездной величиной кометы. Она может несколько изменяться по ходу движения кометы, что и создает неопределенность прогнозов блеска комет. Эту величину можно определить для каждого наблюдения:

Дата	m_0
28 декабря 2011	5.9
21 января 2012	6.6
21 сентября 2012	6.1
1 октября 2012	5.8
27 октября 2012	5.5
3 ноября 2012	5.5
1 декабря 2012	5.5
8 декабря 2012	5.5
4 января 2013	5.3

Мы видим, что абсолютная звездная величина кометы действительно медленно меняется, причем в начале 2013 года яркость кометы нарастала быстрее прогноза. Для определения блеска кометы в эпоху перигелия возьмем величину m_0 , равную 5.5 – это значение дается наибольшим числом наблюдений, когда комета была уже достаточно ярка, и точность измерения блеска улучшилась.

Если комета подходит к Солнцу на расстояние существенно меньшее 1 а.е., то расстояние от нее до Земли будет примерно равно 1 а.е., а его логарифм, входящий в формулу для блеска кометы, обращается в ноль. Вычислим звездную величину кометы в момент ее перигелия (расстояние от Солнца r_p):

$$m_p = m_0 + 10 \lg r_p = -13.5.$$

Комета ISON может стать ярчайшей кометой столетия! Правда, такую большую яркость она будет иметь только непосредственно в перигелии, располагаясь менее чем в двух радиусах Солнца от поверхности светила. На небе она будет менее чем в градусе от Солнца. Чтобы определить максимальный блеск кометы на темном небе, учтем, что для этого она должна отойти от Солнца на угол γ (не менее 18°). Ее расстояние от Солнца, выраженное в астрономических единицах, должно быть не меньше $\sin \gamma = 0.3$. Считая расстояние до Земли вновь равным 1 а.е., получаем значение блеска:

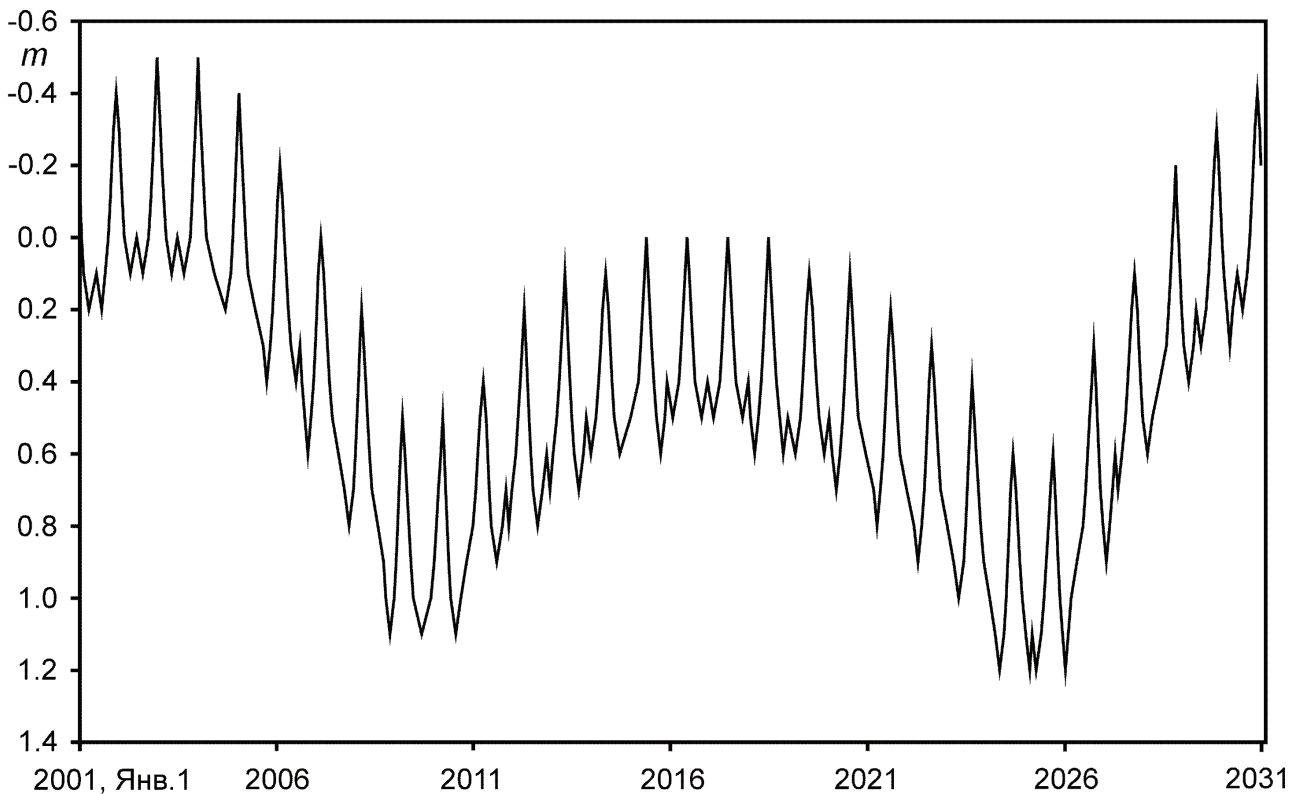
$$m_N = m_0 + 10 \lg (\sin \gamma) \sim 0.$$



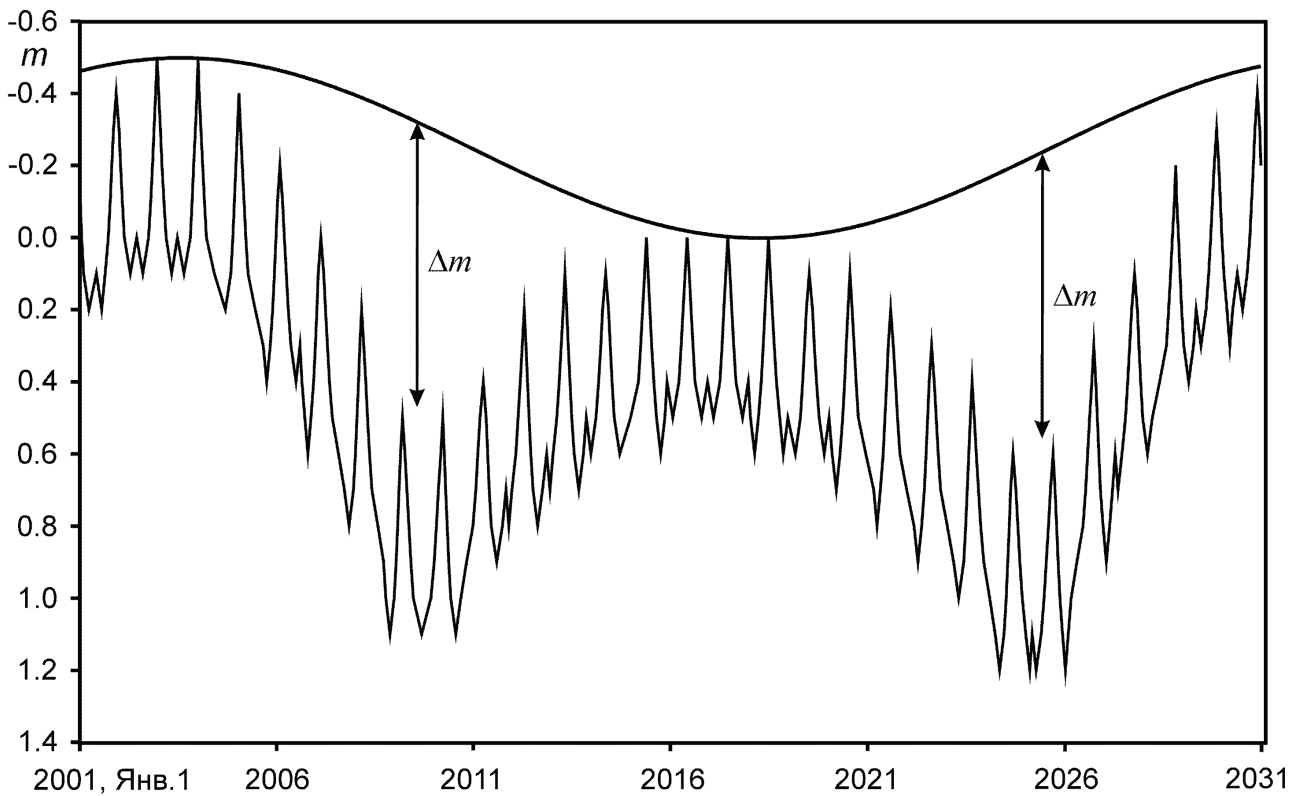
XI. 1 ПЛАНЕТА И КОЛЬЦО

О.С. Угольников

? На графике приведена зависимость блеска Сатурна в небе Земли от времени в течение первых 30 лет XXI века (примерно одного орбитального периода планеты). Исходя из этого графика, оцените соотношение среднего геометрического альбедо (в направлении источника света) Сатурна и его кольца. Полярный радиус Сатурна составляет 0.9 от экваториального радиуса, внутренний и внешний радиусы кольца – 92 и 134 тысячи км. Кольцо считать сплошным и однородным.



! На графике можно отметить несколько периодических составляющих. В первую очередь, блеск Сатурна меняется с амплитудой 0.5-0.6^m с периодом чуть больше одного года. Это есть синодический период Сатурна, и блеск меняется от соединения к противостоянию, прежде всего, за счет изменения расстояния между Сатурном и Землей. Если рассматривать блеск планеты только в противостоянии (или средний за синодический период), то легко заметны еще два фактора. Первый из них имеет период около 15 лет, вдвое меньший орбитального периода Сатурна, и приводит к минимуму блеска около 2009-2010 и 2024-2025 годов. Он связан с изменением ориентации колец Сатурна по отношению к Солнцу и Земле, и в указанные годы кольца расположены ребром к наблюдателю. Второй фактор связан с эллиптичностью орбиты Сатурна, его период равен орбитальному пе-



риоду планеты. Он приводит к тому, что блеск планеты в период максимального раскрытия колец (2002-2003 и 2017-2018 годы) различается.

Эпохи исчезновения колец наступают, когда на Сатурне происходят равноденствия, и Солнце оказывается в плоскости экватора и колец. Эти эпохи разделяются половиной орбитального периода Сатурна, а его блеск в это время примерно одинаков. Из этого можно сделать вывод, что Сатурн в это время оказывается посередине между перигелием и афелием своей орбиты. Соответственно, эпохи максимального раскрытия колец (2002-2003 и 2017-2018 годы) происходят вблизи перигелия и афелия. В этом можно также убедиться, сопоставив разность звездных величин Сатурна в эти эпохи с эксцентриситетом его орбиты.

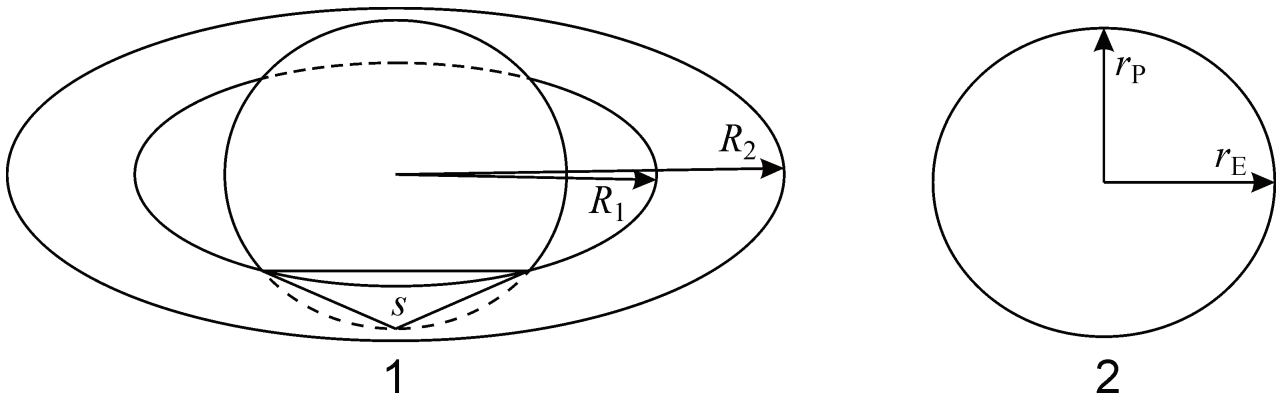
Проведем синусоидальную линию, указывающую, каким был бы блеск Сатурна в противостоянии, если бы раскрытие колец было все время максимальным. Сравнивая реальный блеск Сатурна в противостоянии с этой кривой, получаем, что исчезновение колец приводит к ослаблению блеска Сатурна на величину Δm , равную 0.8^m . Соответствующее отношение величин яркости составляет:

$$J_1/J_2 = 10^{0.4\Delta m} = 2.1.$$

Рассмотрим, как выглядит Сатурн со стороны Солнца (и Земли) во время двух противостояний: с максимальным раскрытием кольца и при его исчезновении, считая расстояние до Сатурна в обоих случаях одинаковым. Видимая площадь диска Сатурна составляет

$$S_1 = \pi r_E r_P / D^2,$$

где r_E и r_P – экваториальный и полярный радиусы Сатурна, D – расстояние до него. Видимая площадь колец во время их максимального раскрытия равна



$$S_2 = \pi (R_2^2 - R_1^2) \sin i / D^2,$$

где R_1 и R_2 – внутренний и внешний радиус кольца, i – угол наклона плоскости экватора и колец Сатурна к плоскости его орбиты. Видимая площадь колец составляет 1.35 от видимой площади Сатурна.

Вне зависимости от раскрытия кольца, в противостоянии мы не наблюдаем теней и видим ту же поверхность Сатурна и колец, которую освещает Солнце. Когда кольца повернуты к Солнцу и Земле ребром, мы видим только полный диск Сатурна. При максимальном раскрытии колец они закрывают часть диска Сатурна (эта площадь обозначена как s на рисунке). У противоположного полюса сам Сатурн закрывает такую же площадь колец. Вычислить величину данной площади в точности трудно, но ее можно определить из рисунка, построенного в точном масштабе. Данную площадь можно аппроксимировать треугольником, показанном на рисунке. Ее приближенное значение оказывается равным 0.1 видимой площади Сатурна. Обозначив альбедо Сатурна и кольца как A_1 и A_2 соответственно, получаем выражение для отношения яркостей Сатурна с максимальным раскрытием колец и без него:

$$\frac{J_1}{J_2} = \frac{A_1(S_1 - s) + A_2(S_2 - s)}{A_1 S_1}.$$

Отсюда получаем соотношение альбедо:

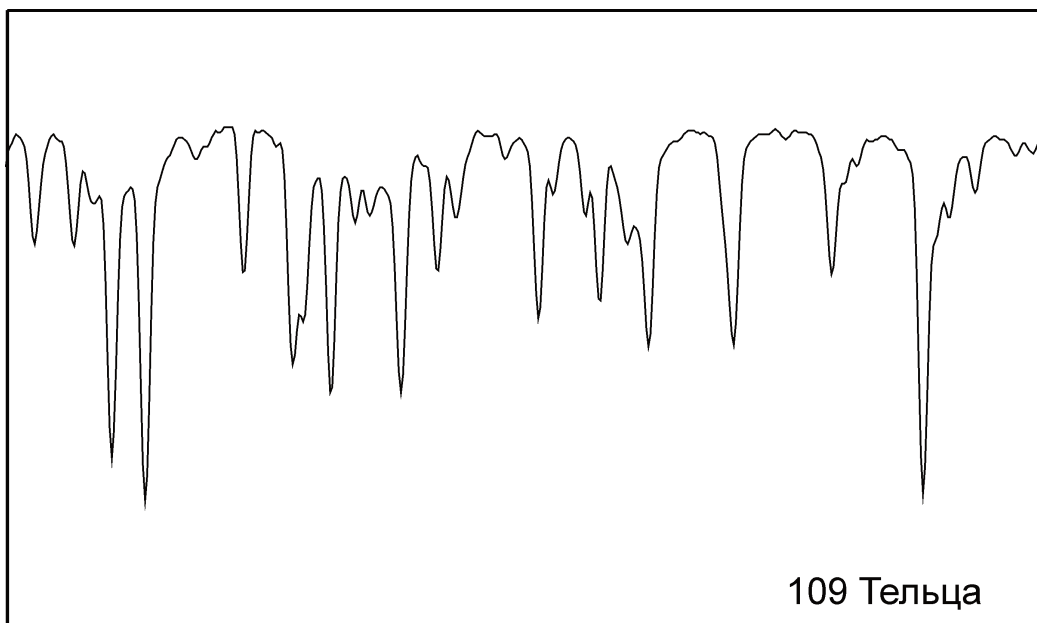
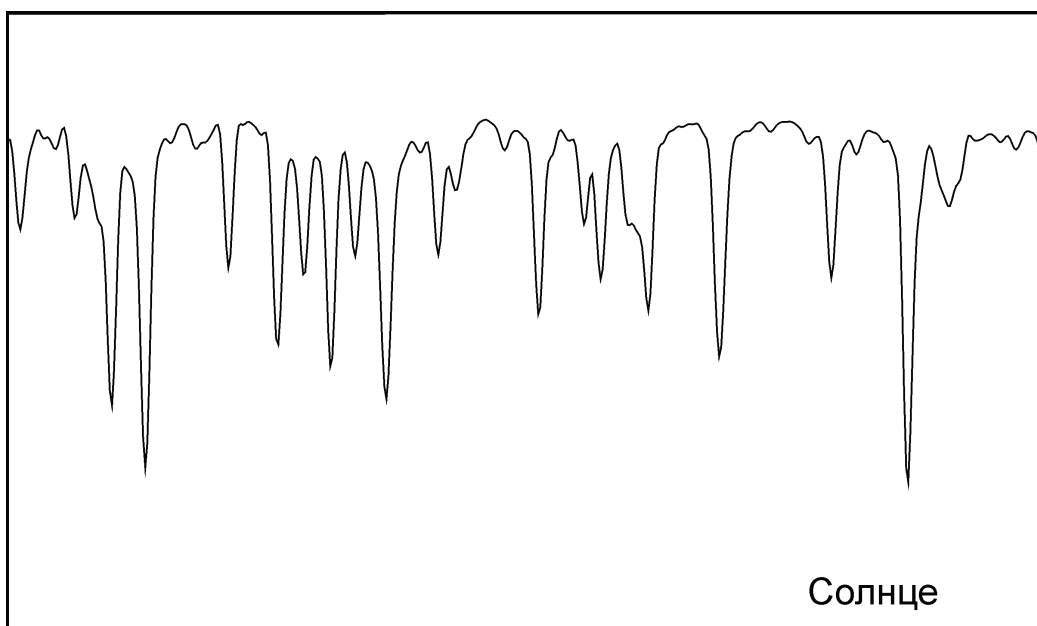
$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{S_1 J_1 - (S_1 - s) J_2}{J_2 (S_2 - s)} = \frac{S_1}{S_2 - s} \cdot \frac{J_1}{J_2} - \frac{S_1 - s}{S_2 - s} \approx 1.$$

Геометрическое альбедо Сатурна и его ярких колец практически совпадает.

XI. 2 СПЕКТРЫ ДВУХ ЗВЕЗД

О.С. Угольников

? Перед Вами участки спектров Солнца и звезды 109 Тельца (спектральный класс G8), полученные в один день из одного пункта примерно на одинаковой высоте над горизонтом. Спектральная область и масштаб обоих спектров по длине волны совпадает, длина волны увеличивается слева направо. В спектрах обеих звезд видны линии, принадлежащие самим звездам, а также теллурические линии водяного пара, возникающие в атмосфере Земли. Длины волн самых сильных линий водяного пара в данной области приведены в таблице. Укажите в спектрах звездные линии и найдите лучевую скорость звезды 109 Тельца относительно Земли.



! Спектральный класс звезды 109 Тельца совпадает с солнечным, отличается лишь подкласс (G2 у Солнца и G8 у 109 Тельца). Поэтому вид звездных линий в их спектрах должен быть похож, но длина волны каждой линии в спектре 109 Тельца смещена вследствие лучевой скорости этой звезды относительно наблюдателя. Линии водяного пара возникают в атмосфере Земли, и для них данного смещения быть не должно. Более того, так как спектры были получены в один день на одинаковом зенитном расстоянии, то можно ожидать (по крайней мере, при стабильной ясной погоде), что вид самих линий водяного пара в обоих спектрах будет одинаковым.

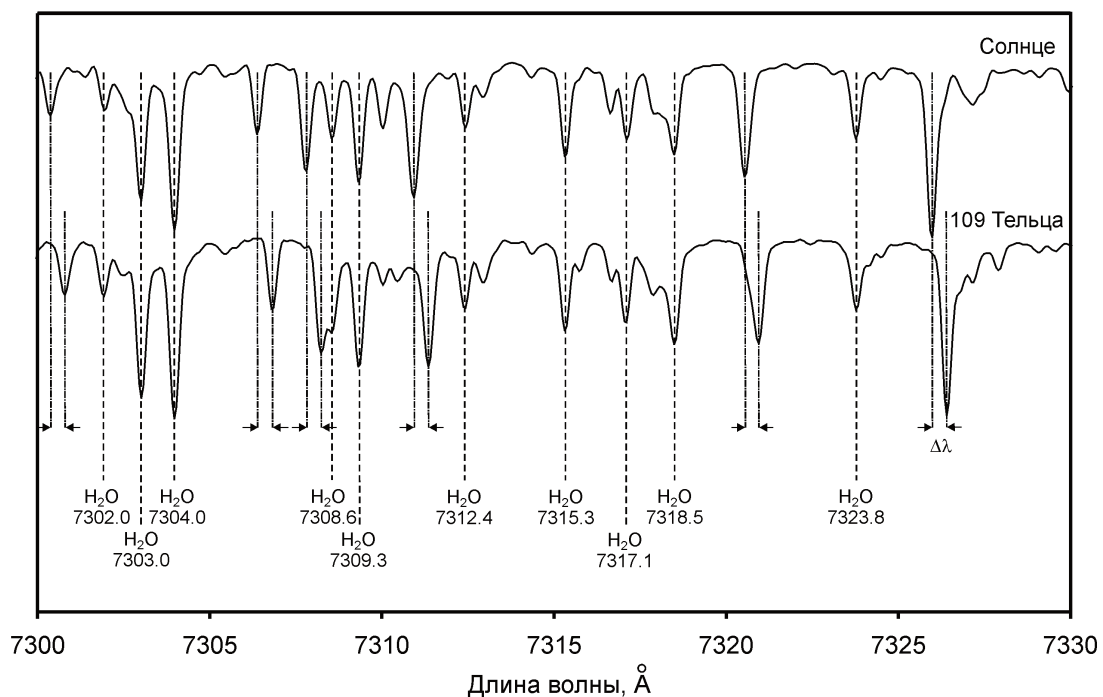
Длины волн линий H₂O (ангстремы):

7302.0	7312.4
7303.0	7315.3
7304.0	7317.1
7308.6	7318.5
7309.3	7323.8

Расположим два спектра друг под другом и отметим в них линии с совпадающими длинами волн и линии, смещенные в спектре звезды 109 Тельца. Среди линий с совпадающими длинами волн можно выделить наиболее сильные и отождествить их со списком, приведенным в условии задачи. Это позволяет восстановить шкалу спектра по длинам волн. Спектр охватывает интервал от 7300 до 7330 ангстрем.

Выделим несколько ярких линий, смещенных в спектре звезды 109 Тельца относительно аналогичных линий в спектре Солнца (в основном это линии нейтрального железа, сильная линия с длиной волны 7326 ангстрем принадлежит нейтральному кальцию). Они смещены в правую сторону, то есть звезда 109 Тельца имеет положительную лучевую скорость и удаляется от нас. Спектральный интервал, представленный на графике, достаточно узкий, и смещение линий в спектре ($\Delta\lambda$) можно считать постоянной величиной. Однако для достижения лучшей точности имеет смысл измерить ее для нескольких линий и усреднить результаты. Величина составляет 0.4 ангстрема, лучевая скорость равна

$$v = c (\Delta\lambda/\lambda) = 16 \text{ км/с.}$$

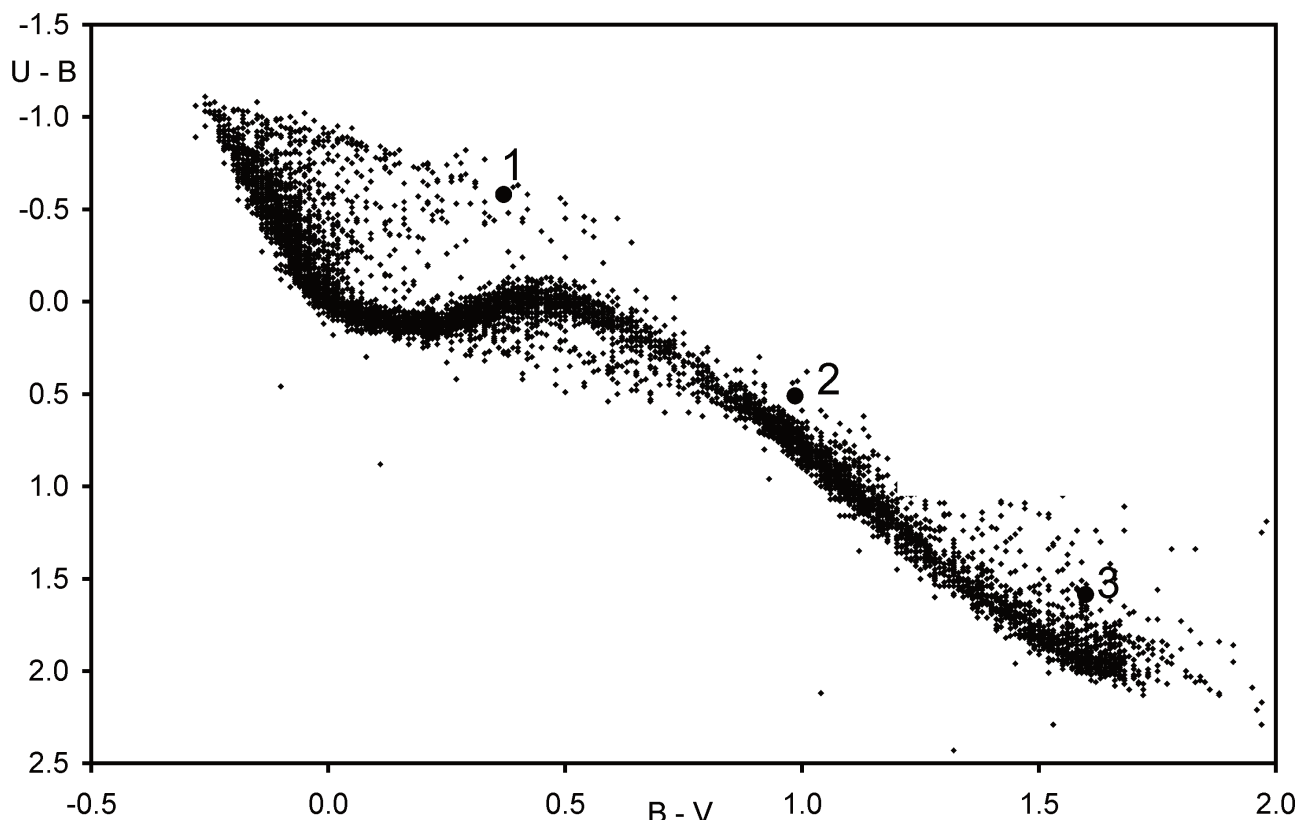


XI. 3

ЯРКИЕ ЗВЕЗДЫ В ПЫЛЕВОМ ДИСКЕ

О.С. Угольников

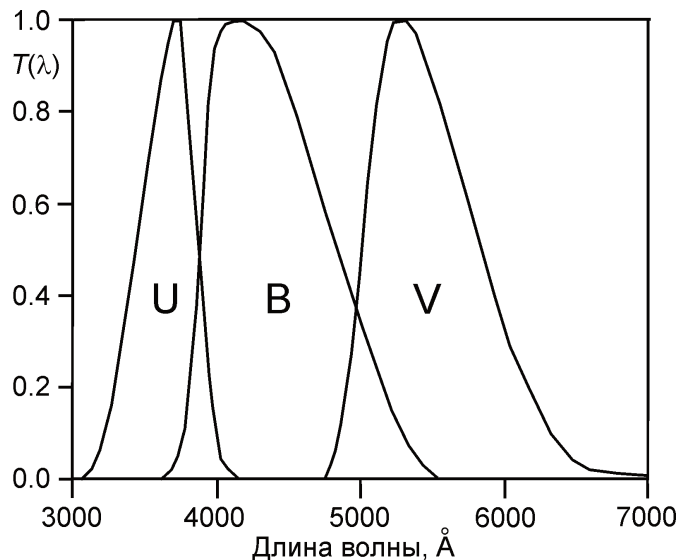
? На диаграмме показано соотношение показателей цвета $U-B$ и $B-V$ для ярких звезд из каталога BSC (Bright Star Catalog, звезды до 6.5^m в полосе V). Определите расстояние до одиночных звезд 1, 2 и 3 из этого каталога, расположенных в диске Галактики, данные о которых также указаны на диаграмме. Межзвездное поглощение света в окрестностях Солнца в диске Галактики составляет 2^m на 1 кпк в полосе V и меняется с длиной волны как $\lambda^{-1.3}$. Спектральные кривые полос U , B и V показаны на отдельном графике.



! Пусть свет далекой звезды в диске Галактики прошел путь r и испытал ослабление межзвездной пылью. Яркость звезды в некоторой спектральной полосе J будет связана с яркостью J_0 на том же расстоянии, но без поглощения, соотношением:

$$J = J_0 e^{-K \cdot r},$$

где K – коэффициент поглощения на единицу пути, зависящий от длины волны. Соответствующее изменение звездной величины будет выражаться формулой:



Практический тур – 11 класс

$$m = m_0 + E \cdot r; \quad E = 1.086 \cdot K.$$

Получается, что если пыль распределена на луче зрения однородно, то ослабление будет пропорционально длине пути. Обозначим поглощение для длины пути в 1 кпк в полосе V как E_V . По графикам кривых полос U, B и V мы можем определить средние (эффективные) длины волн, соответствующие этим полосам: 3600, 4400 и 5500 ангстрем. Тогда мы можем получить аналогичные значения для других спектральных полос:

$$E_B = E_V (\lambda_B / \lambda_V)^{-1.3} \sim 4/3 E_V,$$

$$E_U = E_V (\lambda_U / \lambda_V)^{-1.3} \sim 7/4 E_V.$$

Так как ослабление зависит от длины волны, оно будет менять показатели цвета звезд:

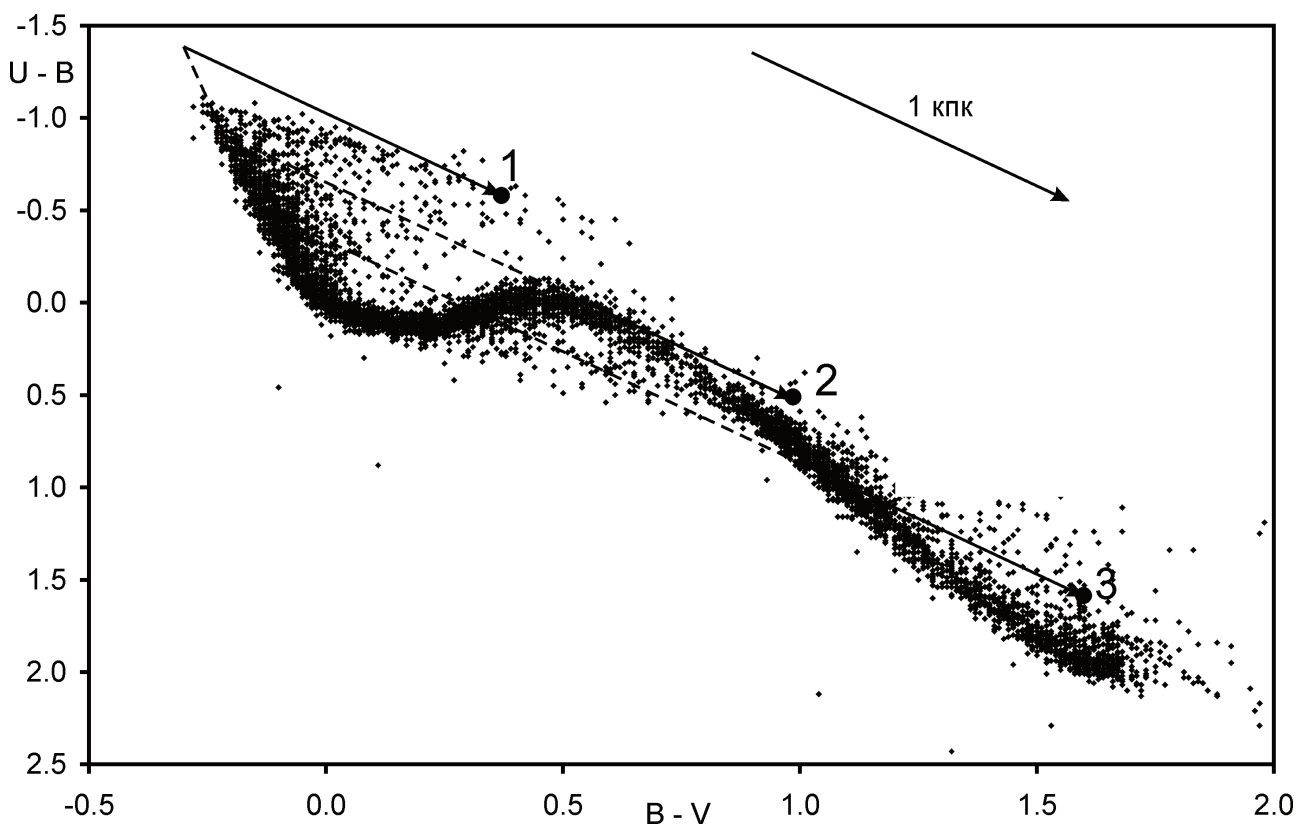
$$(B-V) = (B-V)_0 + (E_B - E_V) \cdot r = (B-V)_0 + E_V ((\lambda_B / \lambda_V)^{-1.3} - 1) \cdot r,$$

$$(U-B) = (U-B)_0 + (E_U - E_B) \cdot r = (U-B)_0 + E_V ((\lambda_U / \lambda_V)^{-1.3} - (\lambda_B / \lambda_V)^{-1.3}) \cdot r.$$

Изменение показателей цвета связано соотношением:

$$\frac{(U-B) - (U-B)_0}{(B-V) - (B-V)_0} = \frac{(\lambda_U / \lambda_V)^{-1.3} - (\lambda_B / \lambda_V)^{-1.3}}{(\lambda_B / \lambda_V)^{-1.3} - 1} = 1.18.$$

Для звезды в диске Галактики, удаленной от нас на 1 кпк, поглощение в полосах U, B и V составит 2.0^m , 2.7^m и 3.5^m соответственно, а показатели цвета (U-B) и (B-V) увеличатся на 0.8^m и 0.7^m , что удовлетворяет последней формуле. Перемещение такой звезды на трехцветной диаграмме показано стрелкой. Если расстояние до звезды отличается от 1 кпк, смещение ее положения на диаграмме будет иметь другую длину, но то же направление.



На рисунке мы видим, что большинство звезд располагается вблизи некоторой кривой, а некоторая часть смещена вправо и вниз, примерно в направлении стрелки, характеризующей межзвездное поглощение. Так как диаграмма построена для наиболее ярких звезд неба, можно сделать вывод, что большая часть этих звезд сравнительно близкие, и межзвездное поглощение невелико. Более далеких звезд, свет которых испытал значительное поглощение, должно быть не так много, так как в качестве таких объектов могут выступать только звезды высокой светимости.

Кривая, к которой группируются большинство звезд, характеризует физическую взаимосвязь двух показателей цвета для звезд разных температур и соответствует нулевому поглощению. Три звезды, подписанные номерами, не находятся на этой кривой, следовательно, влияние поглощения на их яркость и цвет ощутимо. Восстановим положение этих звезд на диаграмме, проведя через них линии, параллельные направлению, указанному в верхней правой части рисунка. Отметим точки пересечения этих линий с кривой, соответствующей нулевому поглощению. Сравнив длину отрезка смещения со стандартной для 1 кпк, мы получим расстояние до звезды.

Расстояние до звезды 1 равно 1 кпк, причем эта звезда – достаточно горячая (спектральный класс O или B), при отсутствии поглощения она характеризовалась бы отрицательными значениями показателей цвета. Для звезды 2 расстояние может принимать два возможных значения – 0.6 или 1.8 кпк (прямая и пунктирная линия на рисунке), причем точность определения первой из этих величин низка (отрезок прямой практически касается кривой нулевого поглощения). Для звезды 3 наиболее вероятной величина расстояния составляет 0.8 кпк. Теоретически возможны два других значения – 1.9 и 2.6 кпк.

Проверим, какие из полученных решений имеют физический смысл. Звезды 1, 2 и 3 входят в каталог ярких звезд, и их блеск в небе Земли m в полосе V не слабее 6.5^m . При отсутствии межзвездного поглощения их блеск был бы равен m_0 , а абсолютная звездная величина составила бы:

$$M = m_0 + 5 - 5 \lg r.$$

Учитывая соотношение между m_0 и m , записанное ранее, получаем:

$$M = m + 5 - 5 \lg r - E_V r.$$

Поглощение E_V составляет 2^m на килопарсек или 0.002^m на парсек. Приравняв видимую величину 6.5^m , для всех возможных решений получаем минимальную абсолютную звездную величину (таблица).

Первые (минимальные) возможные значения абсолютной звездной величины для каждой из трех звезд вполне типичны для звезд-сверхгигантов. Вторые решения для звезд 2 и 3 крайне маловероятны – абсолютные звездные величины близки к максимально возможным значениям для звезд. Третье решение для звезды 3 физического смысла не имеет – таких ярких звезд (светимость более миллиона солнечных) не существует.

	Расстояние r , пк	M
Звезда 1	1000	-5.5
Звезда 2	600	-3.6
	1800	-8.4
Звезда 3	800	-4.6
	1900	-8.7
	2600	-10.8