

XXXI Всероссийская олимпиада по астрономии

Заключительный этап — 2024 г.

Тестовый тур

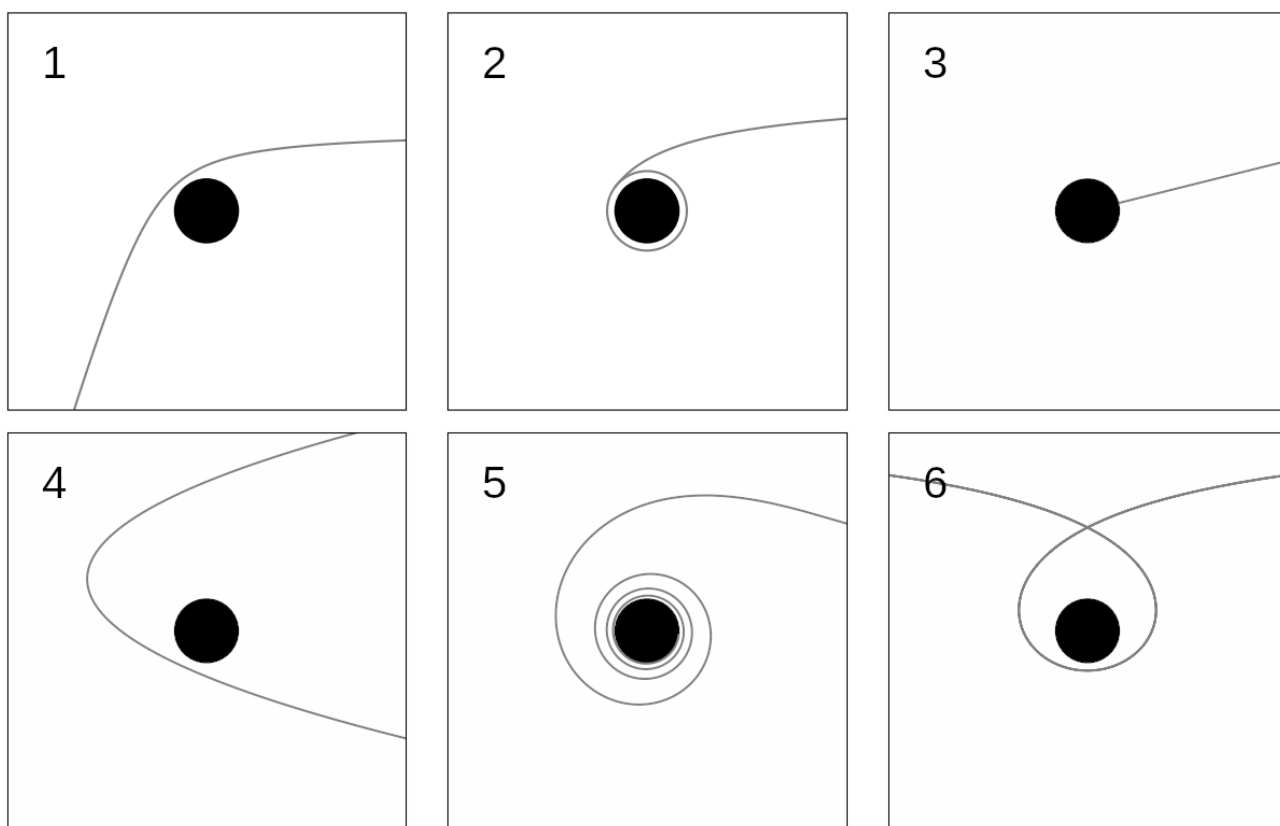
Решения и критерии

9.1. ЧУДЕСА НА ВИРАЖАХ

(Е. Н. Фадеев)



Условие. Межзвездный астероид пролетает мимо одиночной звезды главной последовательности. Вам предоставлено шесть вариантов орбит астероида в гравитационном поле этой звезды. Влияние атмосферы звезды, давления излучения, деформация тел и прочие эффекты не учитываются. Плоскость орбиты совпадает с плоскостью рисунка. Запишите в соответствующей клетке «А», если такая орбита возможна, и «В» — если невозможна.



Решение. Траектория астероида в гравитационном поле звезды может быть только одним из конических сечений: эллипсом, гиперболой или параболой. Кроме того, возможен вырожденный случай движения по прямой. Отсюда делаем вывод, что варианты 2, 5 и 6 невозможны. Также надо вспомнить, что звезда должна находиться в фокусе конического сечения, то есть вариант 4 тоже невозможен.

Ответ: А, В, А, В, В, В.

Алгоритм оценивания. Правильный ответ — 5 баллов. Варианты А, В, В, В, В, В и В, В, А, В, В, В — 3 балла. Указаны как правильные ответы 1, 3 и один любой неправильный — 2 балла. Указаны как правильные ответы 1 или 3 и один любой неправильный — 1 балл. В остальных случаях — 0 баллов.

9.2. ВСЁ ВЫШЕ И ВЫШЕ

(В. Б. Игнатьев)



Условие. Расставьте объекты или точки на небесной сфере в порядке возрастания склонения:

- А. Солнце сегодня (1 апреля)
- В. Центр Галактики
- С. Точка весеннего равноденствия
- Д. Марс сегодня (фаза 0.956, утренняя видимость)
- Е. Радиант метеорного потока Геминиды
- Ф. Ближайшая к Солнечной системе звезда

Решение. Точка весеннего равноденствия по определению лежит на небесном экваторе и имеет склонение 0. Примерно за 10 дней до тура был день весеннего равноденствия. Солнце прошло через точку весеннего равноденствия из южной небесной полусферы в северную, то есть его склонение положительно, но невелико, несколько градусов.

Метеорные потоки называют по латинизированным названиям созвездий, в которых находятся их радианты. Радиант Геминид находится в созвездии Близнецов (*лат. Gemini*). На границе Близнецов и Тельца находится точка летнего солнцестояния. Из этого можем сделать вывод, что радиант Геминид имеет склонение около 15° – 25° . В действительности, радиант находится в северной части созвездия и его склонение около 30° .

Центр Галактики, напротив, находится вблизи от точки зимнего солнцестояния в созвездии Стрельца. Значит, его склонение около -25° . При этом центр Галактики восходит на большей части территории нашей страны, чего не скажешь о ближайшей к Солнцу звезде — α Центавра. Значит, она обладает еще меньшим склонением.

Осталось разобраться с Марсом. Эта планета видна по утрам, то есть находится западнее, а значит, и южнее Солнца. Если бы Марс был в квадратуре, то находился бы рядом с центром Галактики. Определим фазу Марса в квадратуре. Угол Солнце–Марс–Земля равен $\varphi = \arcsin \frac{1}{1.52} \approx 41^\circ$. Тогда фаза равна $\Phi = (1 + \cos \varphi)/2 \approx 0.88$. Эта фаза заметно меньше данной. Делаем вывод, что Марс находится недалеко от Солнца, с небольшим отрицательным склонением.

Правильный ответ: F, B, D, C, A, E.

Алгоритм оценивания. Общая оценка складывается из количества правильных пар в ответе участников. Всего возможных пар из шести объектов — 15, в каждой из них объекты в ответе должны идти в правильном порядке. Например, для пары А–В правильным считается ответ, в котором буква В стоит раньше буквы А (склонение центра Галактики меньше, чем у Солнца).

При появлении в решении двух или трех противоположных пар (например, ответ АВАВ или АВАС с парами АВ и ВА) все эти пары, в том числе правильные, не оцениваются. При дублировании одной пары без противоположной (например, ответ ААВВ) эта пара оценивается только один раз. Итоговая оценка зависит от числа правильных пар N следующим образом:

N	Баллы	N	Баллы	N	Баллы
0	1*				
1	0	6	1	11	3
2	0	7	2	12	3
3	0	8	2	13	4
4	1	9	2	14	4
5	1	10	3	15	5

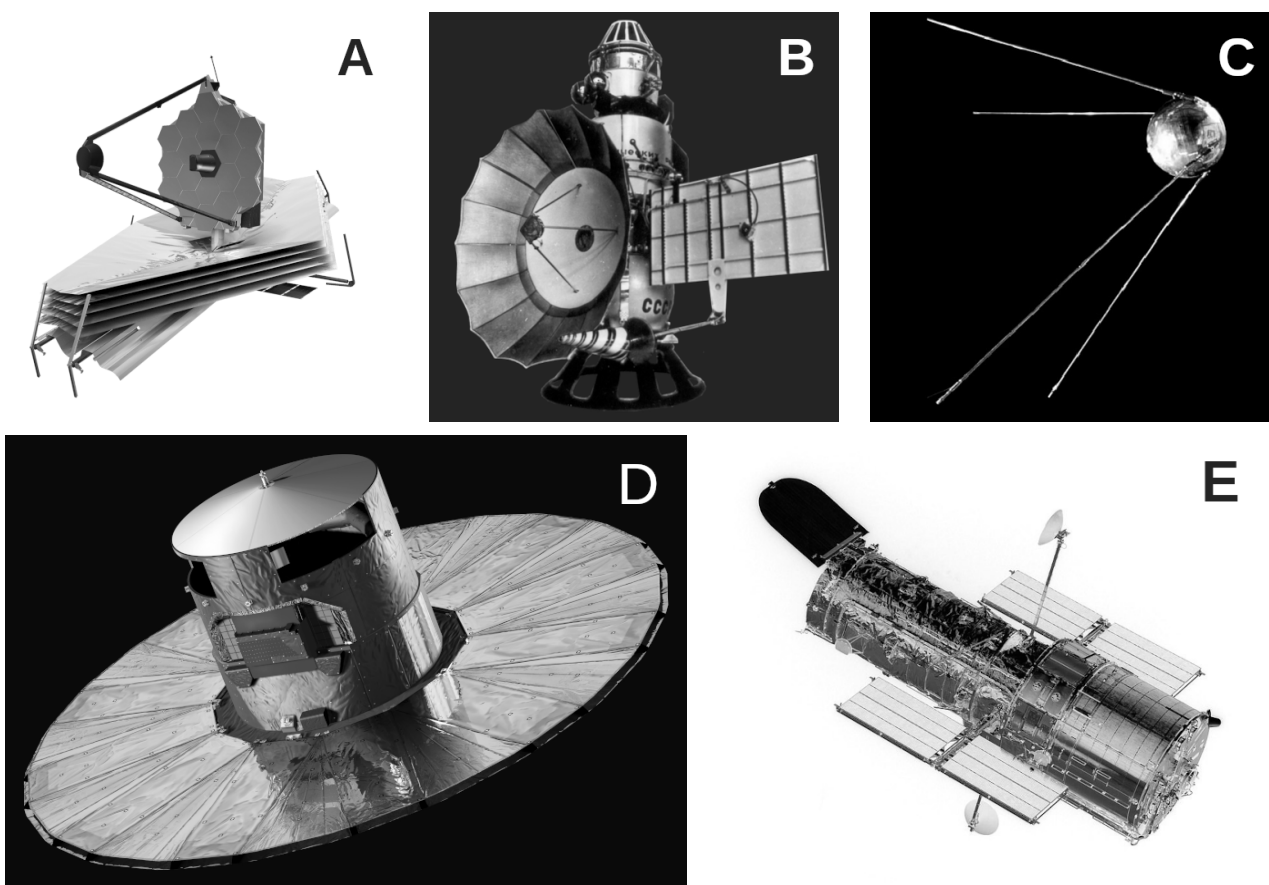
* *Примечание.* «Компенсационный» балл за ответ, написанный в строго обратном порядке, при отсутствии правильных пар, выставляется при условии отсутствия пустых клеток и повторов ответов у участника, то есть только за ответ E-A-C-D-B-F. В других случаях ответ с 0 правильных пар оценивается в 0 баллов.

9.3. ИСТОРИЯ КОСМОНАВТИКИ

(А. В. Веселова)



Условие. Расположите космические аппараты в порядке их запуска с Земли.



Решение. На рисунке А показан телескоп «Джеймс Уэбб» (*англ.* James Webb Space Telescope, JWST). Этот телескоп запущен совсем недавно, в 2021 году, и сейчас активно снабжает нас новой научной информацией. На рисунке В изображён космический аппарат серии «Венера». Такие аппараты исследовали Венеру в конце 60-х — начале 70-х годов XX века. Внимательные участники могут заметить надпись СССР на борту аппарата. На рисунке С представлено изображение первого искусственного спутника Земли. Он был запущен 4 октября 1957 года. На рисунке D показан космический телескоп Gaia. Его запуск был произведен в 2013 году. Рисунок Е показывает телескоп «Хаббл» — пожалуй, самый известный космический телескоп, который уже больше 30 лет поставляет нам важные научные данные, а также прекрасные фотографии. Его запустили в 1990 году.

Ответ: С, В, Е, D, А.

Алгоритм оценивания. Метод оценивания подобен методу в задаче 9.2, но отличается тем, что при пяти упорядочиваемых объектах возможно 10 различных пар. Оценка выставляется исходя из числа правильных пар в соответствии со следующей таблицей.

N	Баллы	N	Баллы
0	1*		
1	0	6	2
2	0	7	3
3	1	8	3
4	1	9	4
5	2	10	5

*Примечание: «Компенсационный» балл за ответ, написанный в строго обратном порядке выставляется по тем же правилам, что и в задаче 9.2.

Источники иллюстраций А, Е — Wikipedia, В — [НПО им. С.А.Лавочкина](#), С — [N+1](#), D — [ESA-D. Ducros, 2013](#)

9.4. СТАЦИОНАРНЫЕ СПУТНИКИ

(В. Б. Игнатьев)



Условие. Вокруг многих тел солнечной системы могут двигаться стационарные спутники, подобно геостационарным спутникам Земли. Расставьте планеты в порядке возрастания горизонтального параллакса их стационарных спутников. Сжатием планет пренебrecь.

- А. Земля
- В. Марс
- С. Юпитер
- Д. Сатурн
- Е. Уран

Решение. Горизонтальный параллакс спутника p — это угол, под которым виден радиус планеты со спутника. Если R — радиус планеты, а a — радиус орбиты спутника, тогда

$$\sin p = \frac{R}{a}.$$

Радиус орбиты спутника выразим из 3-го закона Кеплера: $a^3 = GMT^2/(2\pi)^2$, где M — масса планеты, T — ее период вращения вокруг собственной оси, G — гравитационная постоянная. Возведем первое уравнение в третью степень и подставим величину a^3 :

$$\sin^3 p = \frac{R^3}{a^3} = \frac{4\pi^2 R^3}{GMT^2} = \frac{\frac{4}{3}\pi R^3}{M} \frac{3\pi}{GT^2} = \frac{3\pi}{G\rho T^2} \sim \frac{1}{\rho T^2}.$$

Здесь ρ — средняя плотность планеты. Поскольку синус — монотонная функция на интервале от 0 до $\pi/2$, то можно сделать вывод, что параллакс спутника тем больше, чем больше величина $(\rho T^2)^{-1}$. Нужные величины приведены в таблицах, и искомые значения можно просто посчитать. Но можно сэкономить время, заметив, например, что периоды Марса и Земли почти одинаковые, тогда как плотность Марса почти в 1.5 раза меньше земной. Следовательно, параллакс спутника Марса будет больше. И периоды, и плотности газовых гигантов меньше, а значит, параллаксы их спутников будут больше. Плотность Урана равна плотности Юпитера при большем периоде. Следовательно, параллакс спутника Урана меньше, чем спутника Юпитера. Точно также, периоды Сатурна и Юпитера примерно равны, но плотность Сатурна вдвое меньше, а значит параллакс его спутника самый большой.

Правильный ответ: А, В, Е, С, Д.

Алгоритм оценивания. Идентично задаче 9.3.

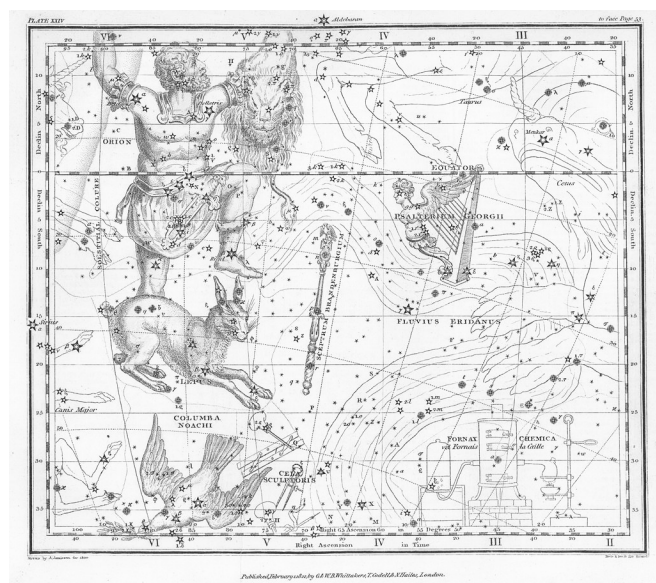
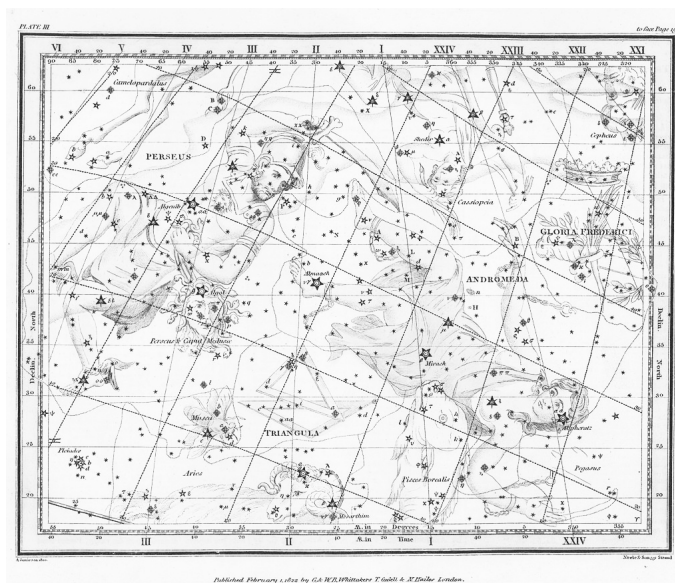
9.5. СТАРЫЙ АТЛАС

(Е. Н. Фадеев)



Условие. На рисунках показаны два листа из звездного атласа Александра Джеймисона, изданного в 1822 году, за 100 лет до того, как Международный астрономический союз утвердил современное разделение небесной сферы на созвездия. В этом атласе можно найти как современные, так и отмененные ныне созвездия. Некоторые созвездия, сохранившиеся на небе, здесь названы несколько иначе, чем мы привыкли. Ниже приведен русский перевод всех присутствующих созвездий. Выберите из списка только отмененные созвездия, т.е. те, которые сейчас нельзя найти на соответствующих местах на небе.

- | | |
|--|--------------------------------------|
| A Aries — Овен | K Gloria Frederichi — Слава Фридриха |
| B Andromeda — Андромеда | L Lepus — Заяц |
| C Caput Medusae — Голова Медузы | M Musca — Муха |
| D Cetus — Кит | N Orion — Орион |
| E Cassiopeia — Кассиопея | O Perseus — Персей |
| F Caela Sculptoria — Инструменты Гравера | P Psalterium Georgii — Лютня Георга |
| G Columba Noachi — Голубь Ноя | R Sceptum Brandenburgicum — |
| H Fluvius Eridanus — Река Эридан | — Бранденбургский скипетр |
| I Fornax Chemica — Химическая Печь | S Triangula — Треугольники |



Решение. Сейчас на звездной карте не найти созвездий Голова Медузы, Слава Фридриха, Лютня Георга и Бранденбургский скипетр. Голова Медузы слилась с созвездием Персея. Слава Фридриха, названная в честь прусского короля Фридриха II Великого, объединена с созвездием Андромеды. Названное в честь английского короля Георга III созвездие Лютня Георга вошло в состав созвездий Эридана, Тельца и Кита. Также частью Эридана стал Бранденбургский Скипетр.

Пятое отмененное созвездие — это Муха. Муху можно найти на современной карте, но совершенно в другом месте — южнее созвездия Южный Крест. В том месте, где находится Муха на приведенной карте, сейчас созвездие Овна.

Для порядка разберемся с остальными созвездиями. Овен, Андромеда, Кит, Кассиопея, Заяц,

Орион и Персей сохранили свои названия без изменений. Из Инструментов Гравера вскоре остался только Резец Гравера, а ныне мы знаем это созвездие как просто Резец. Голубь Ноя, Река Эридан и Химическая Печь также сократили свои названия, превратившись в Голубя, Эридан и Печь. Наконец, созвездие Треугольники, которое получилось путем объединения более старых созвездий Большой и Малый Треугольники, превратилось в современное созвездие Треугольник.

Правильный ответ: С, К, М, Р, R.

Алгоритм оценивания. Каждое правильно выбранное созвездие оценивается 1 баллом, неправильное — 0 баллов. Порядок неважен.

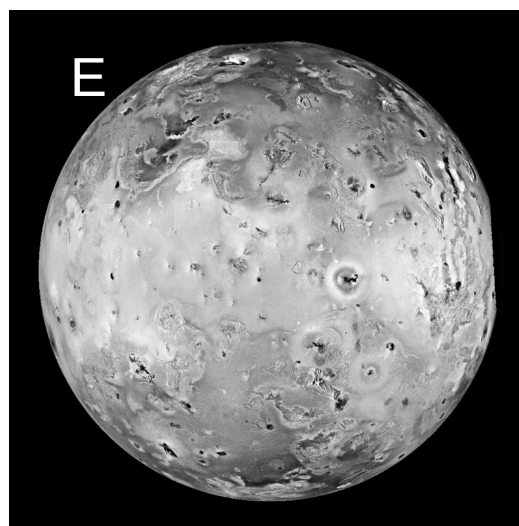
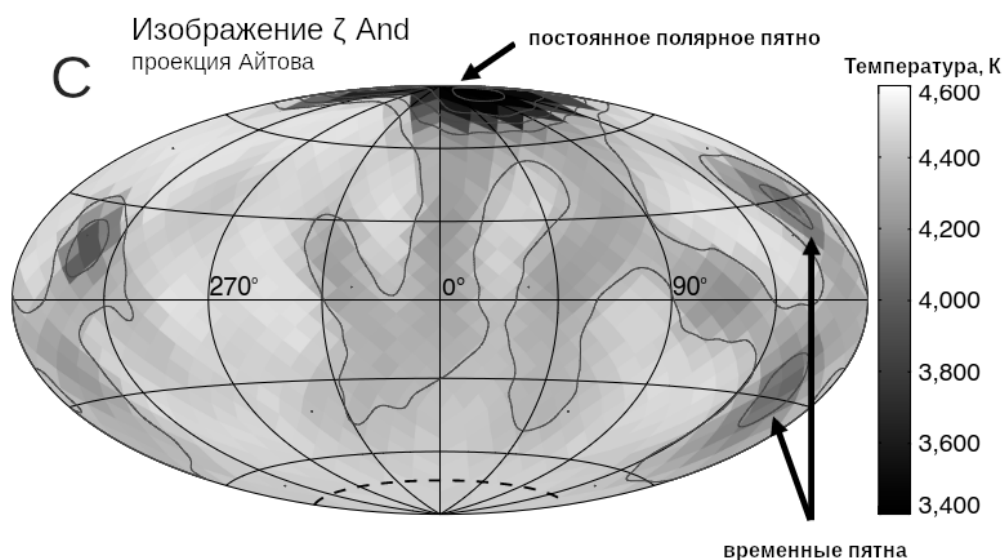
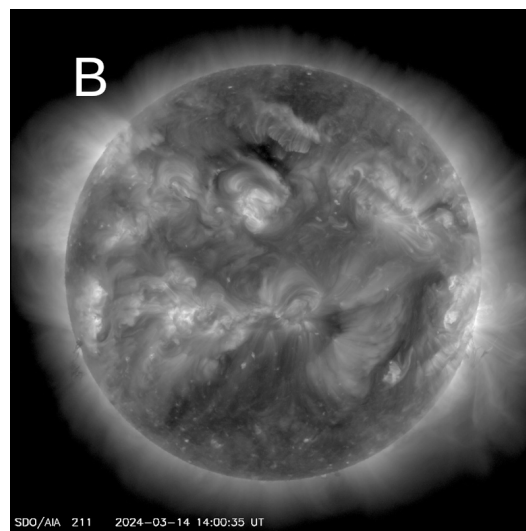
Иллюстрации: [Wikipedia](#)

9.6. ОТ БОЛЬШОГО К МАЛОМУ

(А. В. Веселова)



Условие. Расположите объекты в порядке убывания видимых угловых размеров для наблюдателя на Земле. Если на изображении присутствует несколько объектов, рассматривайте только наиболее крупный.



Решение. На фото А показана Галактика Андромеды (М 31). Ее угловые размеры в несколько раз превышают размеры Луны и составляют около 3° . На изображении В показано Солнце при наблюдении на длине волны $211\text{\AA}$. Угловые размеры Солнца составляют около 0.5° .

На рисунке С показана карта поверхности звезды ζ Андромеды, полученная методами оптической интерферометрии. Диски звезд крайне проблематично разрешать, из чего уже следует, что угловые размеры объекта крайне малы. Можно сделать простую прикидку: даже если мы наблюдаем звезду-гигант с радиусом 100 радиусов Солнца с расстояния, например, 5 пк (на самом деле, на таком малом расстоянии крупных звезд нет, но оценка от этого станет лишь более надежной), мы получим угловой диаметр в угловых секундах, равный

$$\frac{200 \cdot 7 \cdot 10^5 \text{ км}}{5 \cdot 3 \cdot 10^{13} \text{ км}} \cdot 206265 \approx 0.2''.$$

В реальности звезда заметно меньше (около 16 радиусов Солнца) и дальше (60 пк), поэтому угловые размеры оказываются существенно меньше полученной оценки.

На снимке D показана галактика Водоворот. Она не принадлежит Местной группе галактик и удалена на десятки миллионов световых лет, соответственно ее видимый угловой размер заметно меньше, чем у галактики Андромеды, и уступает размеру Солнца. В действительности угловой размер галактики составляет около $10'$.

На снимке Е показан спутник Юпитера Ио. Юпитер достаточно легко можно увидеть как диск в простейшие бинокли. Его угловой размер примерно равен половине угловой минуты. Ио раз в 20 меньше Юпитера, поэтому ее угловой размер должен быть около угловой секунды. Можно эту величину вычислить точнее

$$\frac{2 \cdot 1800 \text{ км}}{5 \cdot 1.5 \cdot 10^8 \text{ км}} \cdot 206265 \approx 1''.$$

За счет того, что Земля может быть на 1 а. е. ближе или дальше от Юпитера и Ио, эта величина немного меняется в течение года. Но и без численной оценки можно было бы вспомнить, что в отличие от далеких звезд диск Ио могут разрешить современные большие любительские телескопы. В то же время объекты каталога Мессье сразу открывались как протяженные, а разрешить спутники Юпитер удалось далеко не сразу.

Правильный ответ: А, В, D, Е, С.

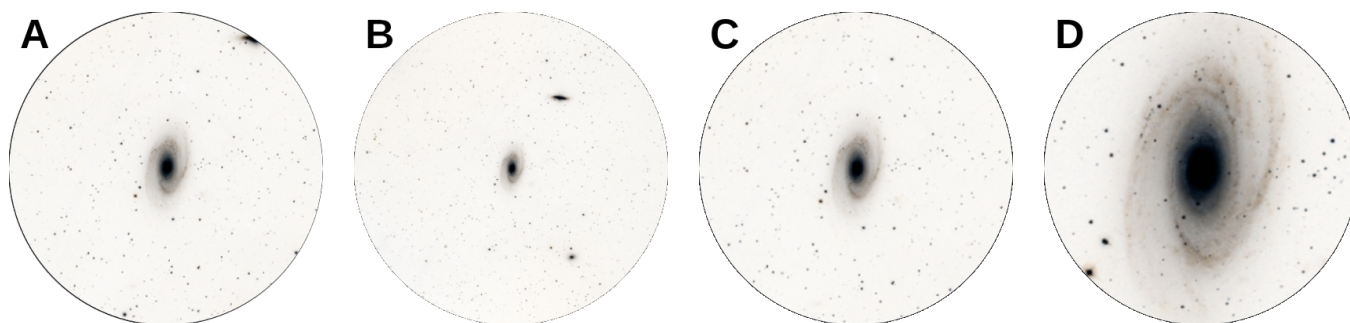
Алгоритм оценивания. Идентично задаче 9.3.

Иллюстрации: А, D — Wikipedia, В — [Solar Dynamics Observatory](#), С — [Roettenbacher et al](#), Е — [The Galileo Project](#), JPL, NASA



9.7. О ВАЖНОСТИ ЖУРНАЛА НАБЛЮДЕНИЙ (Е. Н. Фадеев)

Условие. Два астронома-любителя вели наблюдение одного и того же объекта с помощью телескопов с объективами одного диаметра, но разными фокусными расстояниями ($q_1 = 550$ мм, $q_2 = 1000$ мм). У них был один набор окуляров на двоих с фокусными расстояниями $p_1 = 7$ мм, $p_2 = 12$ мм, $p_3 = 19$ мм и $p_4 = 25$ мм. Поле зрения всех окуляров одинаковое. Вам даны четыре негативных изображения, которые астрономы могли увидеть в свои телескопы. Соотнесите каждое изображение с парой объектив–окуляр.



Решение. Изображения отличаются только увеличением, которое вычисляется по формуле $\Gamma = F/f$. Определим увеличения для всех комбинаций и поместим результаты в таблицу.

	p_1	p_2	p_3	p_4
q_1	79	46	29	22
q_2	143	83	53	40

Изображение В и D максимально отличаются масштабом. С помощью линейки определяем, что масштаб изображения D больше более чем в 6 раз. При этом максимально и минимально возможные увеличения отличаются как раз в 6.5 раз. Из этого делаем вывод, что изображение В соответствует случаю $q_1 = 550$ мм, $p_4 = 25$ мм, а изображение D — $q_2 = 1000$ мм, $p_1 = 7$ мм.

Точно так же определяем отношение масштабов для изображений А и С. Масштаб А больше масштаба В примерно в 1.9 раза и меньше масштаба D в 3.6 раза. Получаем, что самое подходящее увеличение равно 40, что соответствует варианту $p_2 = 1000$ мм, $p_4 = 25$ мм.

Масштаб С больше, чем масштаб В, примерно в 2.1 раза и меньше масштаба D в 3.1 раза. Самое подходящее увеличение равно 46, что соответствует варианту $p_1 = 550$ мм, $p_2 = 12$ мм.

Правильный ответ:

	С		В
D			А

Алгоритм оценивания. Правильно поставленные в свои ячейки буквы D и В оцениваются по 1 баллу. В противном случае — 0 баллов. Буква А в ячейках q_2p_4 или q_1p_2 оценивается 1 баллом. Буква С в ячейках q_1p_2 или q_2p_3 оценивается 1 баллом. Если А и С одновременно стоят на позициях q_2p_4 и q_1p_2 , то выставляется дополнительный балл (исключение см. ниже). Если ни одна буква не стоит в своей ячейке (оценка 0), но все четыре расположены в правильном порядке по возрастанию увеличения, то выставляется 1 балл.

Если одна и та же буква появляется в двух ячейках одновременно, то данная буква не учиты-

вается в подсчете результата. Исключение: одновременное появление буквы А в ячейках q_2p_4 и q_1p_2 или буквы С в ячейках q_1p_2 и q_2p_3 . В таком случае выставляется 1 балл за букву, но дополнительный балл не выставляется.

Иллюстрации: [Aladin Sky Atlas](#)

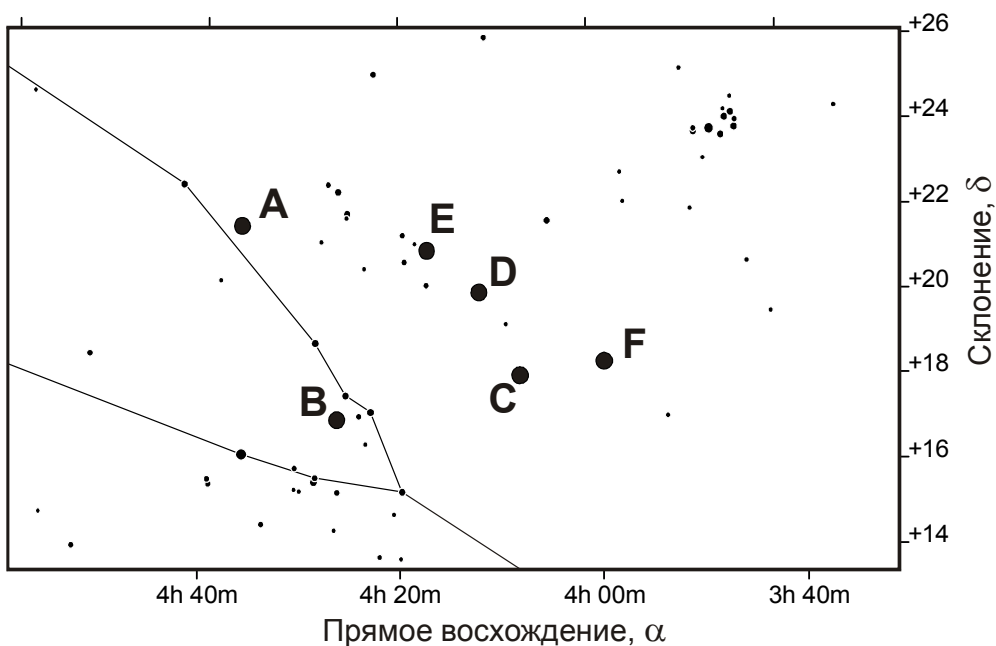
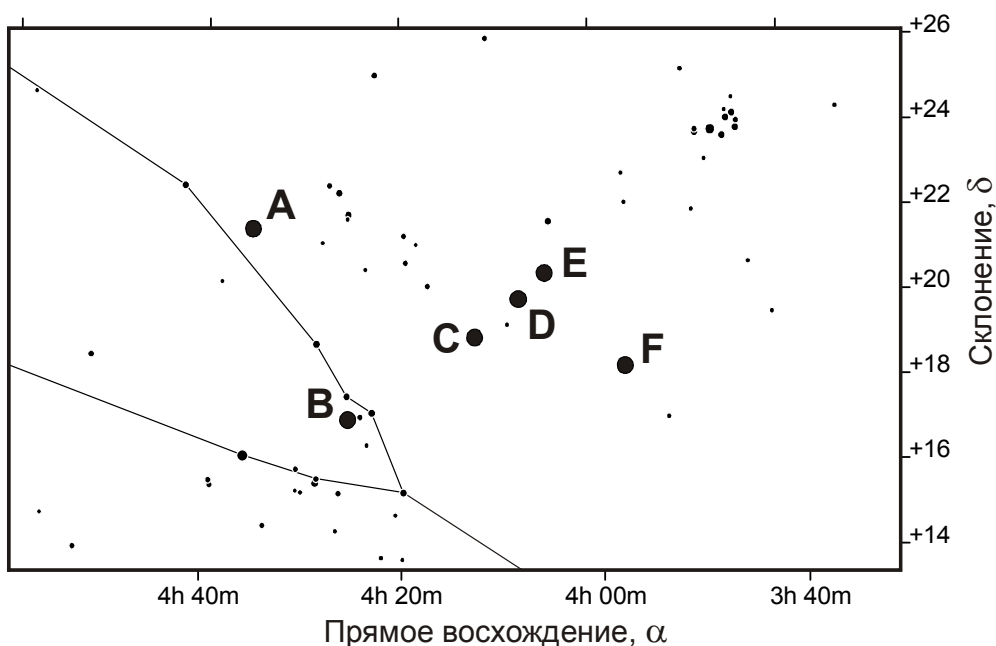
Всероссийская олимпиада школьников по астрономии
Заключительный этап – 2024 год
Третий (тестовый) тур

ТЕСТОВЫЙ ТУР

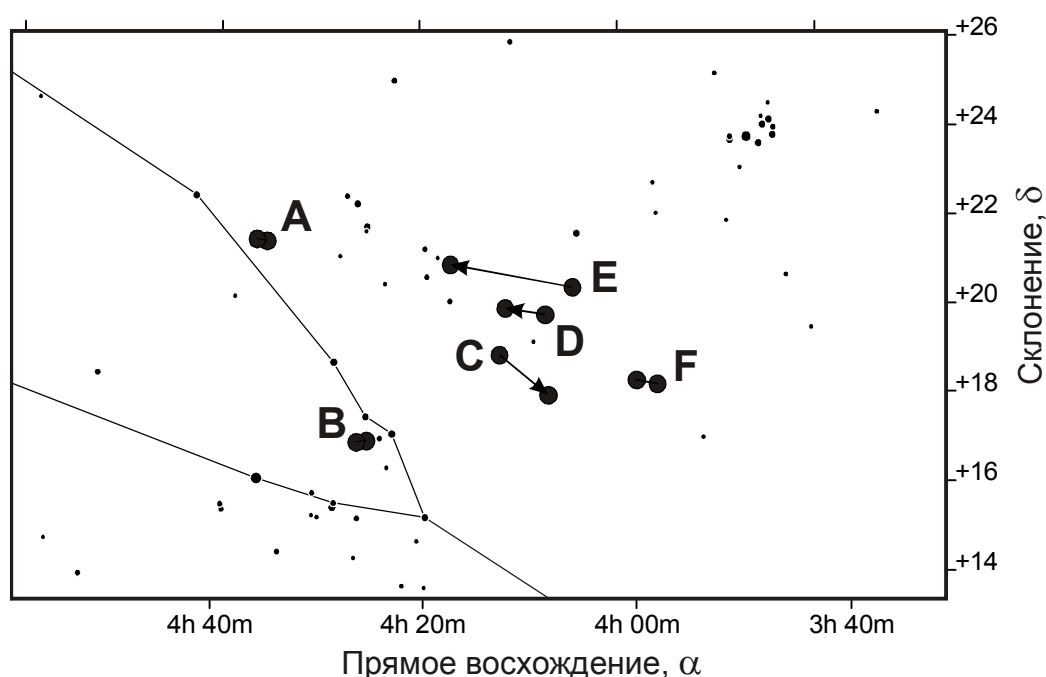


10/11.1. ШЕСТЬ В ОДНОМ (О.С. Угольников)

1. Условие. На Земле случилось редкое событие – шесть больших планет (Меркурий, Венера, Марс, Юпитер, Сатурн и Уран) оказались в одном созвездии Тельца. На двух звездных картах показано положение этих шести планет с интервалом в 4 дня (большие черные кружки). Расставьте планеты А, В, С, D, E и F в порядке их пространственного удаления от Солнца (от Меркурия к Урану). Считать, что событие происходит в XXI веке.



1. Решение. Перенесем изображения планет в два момента времени на одну звездную карту:



Мы видим, что из шести планет пять движутся среди звезд в прямом направлении, с запада на восток, и только одна – планета С – в попятном. Так как планеты находятся достаточно близко друг к другу на небе, и среди них есть две внутренние, то Солнце располагается тоже неподалеку от этой области неба. Вблизи соединения с Солнцем внешние планеты попятно двигаться не могут, следовательно, планета С – Меркурий или Венера.

Из оставшихся пяти планет четыре – внешние, и вблизи их соединения угловая скорость монотонно уменьшается с расстоянием планеты от Солнца – от Марса к Урану. Но на картах мы видим две планеты – А и В – с очень маленьким и примерно одинаковым смещением с запада к востоку. При этом планета В сильно удалена от эклиптики к югу, о чем можно судить по положению и перемещению других планет (а также по ее расположению в гуще звездного скопления Гиады в созвездии Тельца). Никакая внешняя планета, тем более Уран, так далеко от эклиптики вблизи соединения удалиться не может, в чем можно убедиться, например, по величине наклона орбиты Урана к эклиптике в справочных данных. Итак, планета В – также внутренняя, и в данный момент она расположена вблизи точки стояния, когда ее попятное движение сменяется прямым или наоборот.

Нам надо понять, какая из планет (В или С) – Меркурий, а какая – Венера. Вспомним, как расположены орбиты этих планет в пространстве. Прохождения Меркурия по диску Солнца в летний сезон в конце II – начале III тысячелетия наступают в начале мая в созвездии Овна. Прохождения Венеры по диску Солнца происходят в начале июня в созвездии Тельца, как раз в той области неба, которая изображена на картах. Если Венера на выданных картах находится вблизи нижнего соединения, она должна располагаться недалеко от эклиптики. Венера может опуститься ниже эклиптики в начале лета только после нижнего соединения и даже вступить в западную точку стояния там, где располагается планета В (это бы произошло в самом конце июня). Но тогда Меркурий не мог бы находиться западнее Венеры, дальше от Солнца, и двигаться при этом попятно вблизи эклиптики, как планета С.

Другой способ правильно убедиться в этой ситуации состоит в том, что Венера оказывается в точке стояния на достаточно большом угловом расстоянии от Солнца – около 28° . Если бы

планета В была Венерой, то Меркурий (С) оказался бы на удалении не меньше 25° от Солнца. Он может быть на такой элонгации, но не будет двигаться при этом попятно. Итак, Меркурий на карте обозначен буквой В, Венера – буквой С.

С внешними планетами ситуация проще, их нужно расположить в порядке убывания угловой скорости. Таким образом, Марс помечен буквой Е, Юпитер – буквой D, Сатурн – буквой F, Уран – буквой А. Правильный ответ на задание – В, С, Е, D, F, А.

Положение планет на картах соответствует их реальному расположению на небе 13 и 17 июня 2028 года (Меркурий, Венера, Марс, Уран), тем же датам в 2024 году (Юпитер) и в 2030 году (Сатурн).

1. Алгоритм оценивания. Общая оценка складывается из количества правильных пар в ответе участников. Всего возможных пар из шести объектов – 15, в каждой из них объекты в ответе должны идти в правильном порядке. Например, для пары А-В правильным считается ответ, в котором буква В стоит раньше буквы А (Меркурий находится ближе к Солнцу, чем Уран).

При появлении в решении двух или трех противоположных пар (например, ответ АВАВ или АВАС с парами АВ и ВА) все эти пары, в том числе правильные, не оцениваются. При дублировании одной пары без противоположной (например, ответ ВВАА) эта пара оценивается только один раз. Итоговая оценка зависит от числа правильных пар N следующим образом:

N	Баллы	N	Баллы	N	Баллы
0	1*				
1	0	6	1	11	3
2	0	7	2	12	3
3	0	8	2	13	4
4	1	9	2	14	4
5	1	10	3	15	5

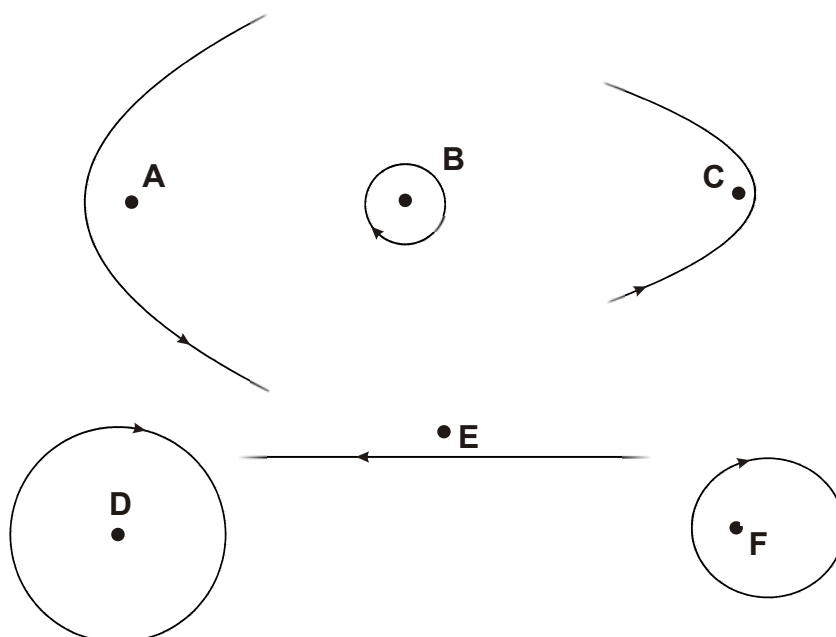
**Примечание:* "компенсационный" балл за ответ, написанный в строго обратном порядке, при отсутствии правильных пар, выставляются при условии отсутствия пустых клеток и повторов ответов у участника, то есть только за ответ А-F-D-E-C-B. В других случаях ответ с 0 правильных пар оценивается в 0 баллов.



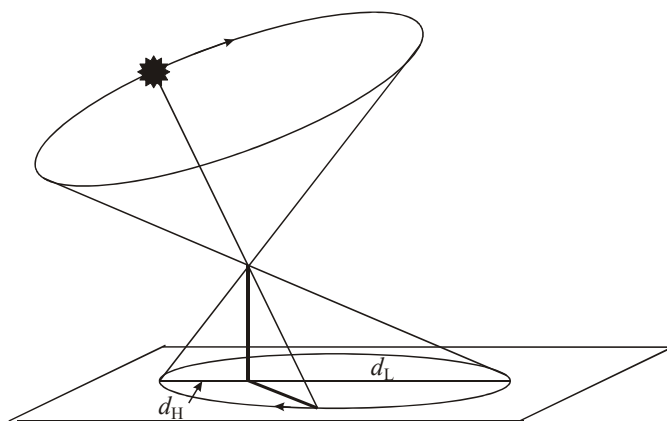
10/11.2. СЛЕДЯЩИЕ ЗА СОЛНЦЕМ

(О.С. Угольников / В.Б. Игнатьев)

2. Условие. В шести пунктах на Земле установили горизонтальные солнечные часы с вертикальным гномоном одинаковой высоты. Перед Вами – изображение линий, которые описал конец тени гномона в течение какого-то одного дня, на горизонтальной плоскости (вид сверху), указано направление движения конца тени. Известно, что даты, соответствующие рисункам, не совпадают, но находятся в интервале от 1 января до 20 июня одного календарного года. Масштаб всех рисунков одинаков, положение гномона отмечено точкой. Ориентация рисунков относительно сторон горизонта различается и неизвестна. Часть линии может не вмещаться в циферблат. Расположите рисунки А, В, С, D, E и F в хронологическом порядке соответствующих им дат.



Решение. Обратим внимание, что если мы соединим конец гномона со всеми точками видимого суточного пути Солнца, то мы получим конус с осью, направленной в северный или южный полюс мира. Траектория, которую описывает конец тени гномона, есть пересечение конуса, симметричного описанному выше, и горизонтальной плоскости. Таким образом, эта линия – коническое сечение, которое может быть эллипсом, параболой или гиперболой, в вырожденных случаях – кругом или прямой линией.



Линия будет иметь вид замкнутого эллипса или окружности, если Солнце в данном пункте в соответствующую дату будет незаходящим. Такая ситуация реализуется на схемах В, D и F, заметим, что во всех трех случаях тень движется по часовой стрелке, то есть дело происходит в высоких широтах северного полушария весной или летом.

В случаях А и С траектория разомкнута. Можно заметить, что она представляет собой параболу. Такой она будет, если нижняя кульминация Солнца происходит около горизонта. Теперь тень движется против часовой стрелки, то есть пункты А и С находятся в южных приполярных широтах, и дело происходит южным летом, то есть в начале года.

Наконец, траектория Е представляет из себя прямую линию. Это происходит, если вершина гномона сама оказывается в плоскости суточного пути Солнца, то есть в равноденствие. Таким образом, для рисунка Е мы можем сразу указать дату – 20 или 21 марта. Движение тени относительно гномона там идет по часовой стрелке, то есть солнечные часы Е установлены в северном полушарии, хотя для решения данной задачи это значения не имеет.

Раньше весеннего равноденствия (то есть раньше картины Е) наступили события, отраженные на картинах А и С. В обоих случаях это произошло в южных высоких широтах местным астрономическим летом. Обратим внимание, что трек тени С подходит ближе к гномону, чем в случае А. Это означает, что Солнце в полдень там было выше над горизонтом. Тем не менее, даже попавшая на часы часть трека охватывает больший диапазон азимутов, чем в случае А. Уже из этого можно сделать вывод, что Солнце в случае С сильнее удалено от небесного экватора, и картина наблюдается дальше от полюса, чем в случае А, но ближе к зимнему солнцестоянию. Этого уже достаточно для вывода, что событие С произошло раньше события А. Если дополнительно учесть, что оба трека представляют собой параболы, то есть Солнце в нижней кульминации располагается на горизонте, то можно (хотя и не обязательно для решения) дать и более точный ответ. Для нижней кульминации Солнца в южном полушарии имеем:

$$h_L = -90^\circ - (\varphi + \delta) = 0,$$

откуда мы имеем $\varphi + \delta = -90^\circ$. Тогда высота в верхней кульминации в южном полушарии есть

$$h_H = 90^\circ + \varphi - \delta = -2\delta.$$

В случае С эта высота больше, то есть склонение Солнца меньше. Итак, первые три буквы в ответе – С, А, Е.

Рассмотрим оставшиеся три трека, которые соответствуют уже северному лету в полярных широтах. Они замкнуты, то есть Солнце во всех случаях незаходящее и даже в нижней кульминации находится существенно выше горизонта. Треки В и D близки к окружностям, а

трек D вообще является окружностью с центром в положении гномона. Такая ситуация может иметь место вблизи северного полюса. Масштабы треков по условию одинаковы, и радиус трека пропорционален тангенсу зенитного расстояния $\tan(90^\circ - h) \approx \tan(90^\circ - \delta)$. В случае В радиус меньше, то есть склонение Солнца больше, и он следует позже трека D.

Наконец, трек F представляет собой эллипс. Минимальное расстояние от гномона d_H соответствует верхней кульминации Солнца, а максимальное d_L – его нижней кульминации:

$$d_H = H \tan(90^\circ - h_H) = H \tan(\varphi - \delta_F).$$

$$d_L = H \tan(90^\circ - h_L) = H \tan(180^\circ - \varphi - \delta_F).$$

Здесь H – высота гномона. Эти расстояния существенно различаются, что указывает на отличие широты φ от полюса. Мы можем видеть, что расстояние d_H совпадает с большой полуосью практически круглого трека В, который равен $H \tan(90^\circ - \delta_B)$, а расстояние d_L чуть меньше радиуса круга D, равного $H \tan(90^\circ - \delta_D)$. Из этого следует, что $\delta_F < \delta_B$ и $\delta_F > \delta_D$. К тому же выводу можно было прийти существенно более простыми рассуждениями: в приполярных широтах большая полуось эллипса близка к $H \tan(90^\circ - \delta)$, и картины нужно расположить в порядке уменьшения большой полуоси: D, F, В.

В итоге, ответ на задание выглядит так: С, А, Е, D, F, В. Представленные на рисунке треки соответствуют следующим датам:

С – 1 января ($\delta = -23^\circ$), широта -67° .

А – 23 февраля ($\delta = -10^\circ$), широта -80° .

Е – 21 марта ($\delta = 0^\circ$), широта $+56^\circ$.

D – 12 апреля ($\delta = +9^\circ$), широта $+90^\circ$.

F – 1 мая ($\delta = +15^\circ$), широта $+84^\circ$.

В – 12 июня ($\delta = +23.2^\circ$), широта $+88^\circ$.

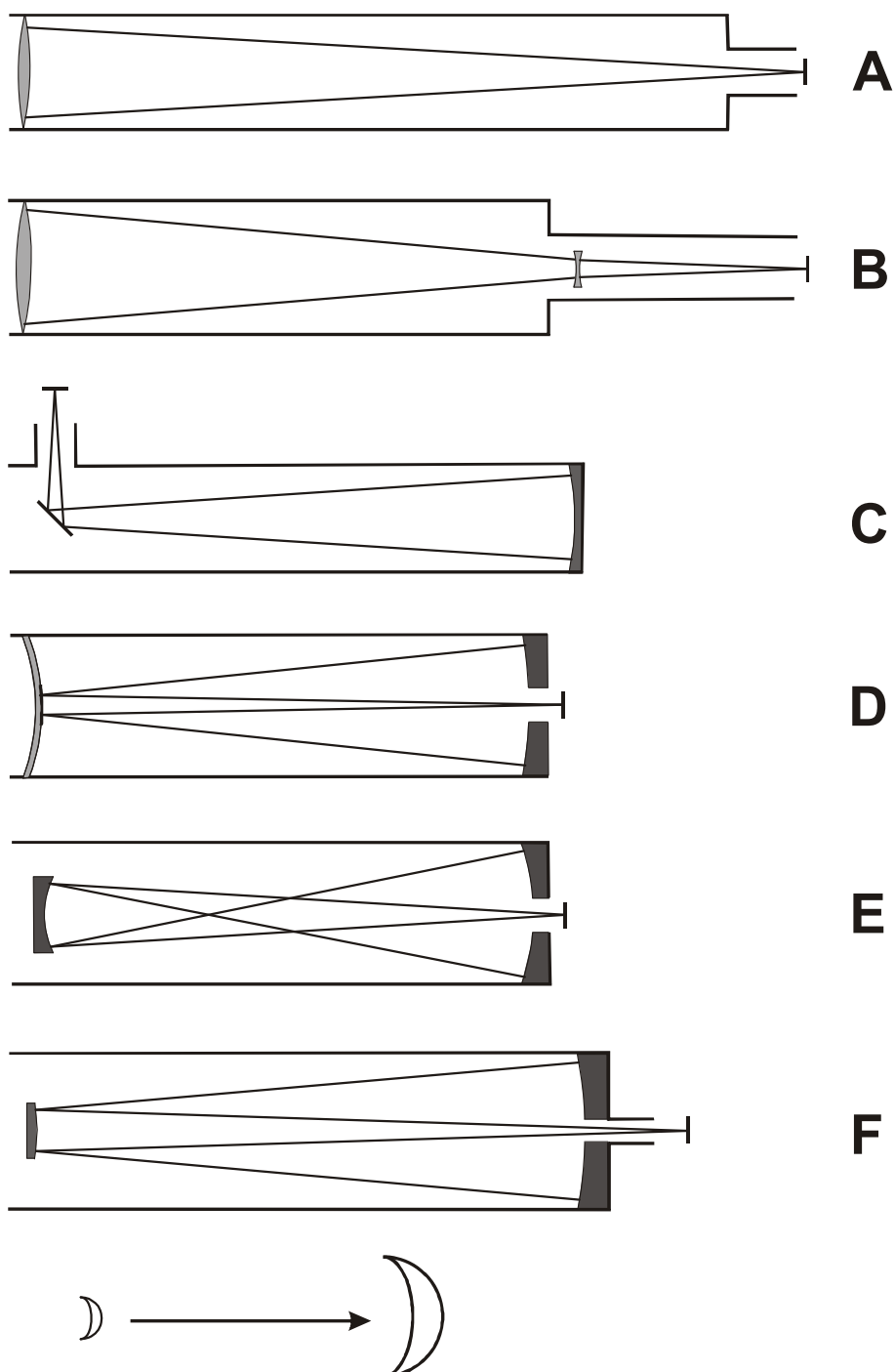
2. Алгоритм оценивания. Система подсчета оценки базируется на вычислении правильных пар в ответе участника, аналогично заданию 1.



10/11.3. ТЕЛЕСКОП НА ЛЮБОЙ ВКУС

(О.С. Угольников)

3. Условие. Вам предложены оптические схемы шести телескопов в одинаковом масштабе. На схемах показаны линии распространения света от бесконечно удаленного источника, находящегося на оптической оси телескопа, направление на источник – влево на рисунках. В фокальных плоскостях телескопов (показаны жирными черточками) строятся изображения протяженного небесного объекта. Расставьте телескопы в порядке увеличения размера этого изображения – от самого малого к самому большому (см. схему внизу рисунка). Аберрациями оптики пренебречь.

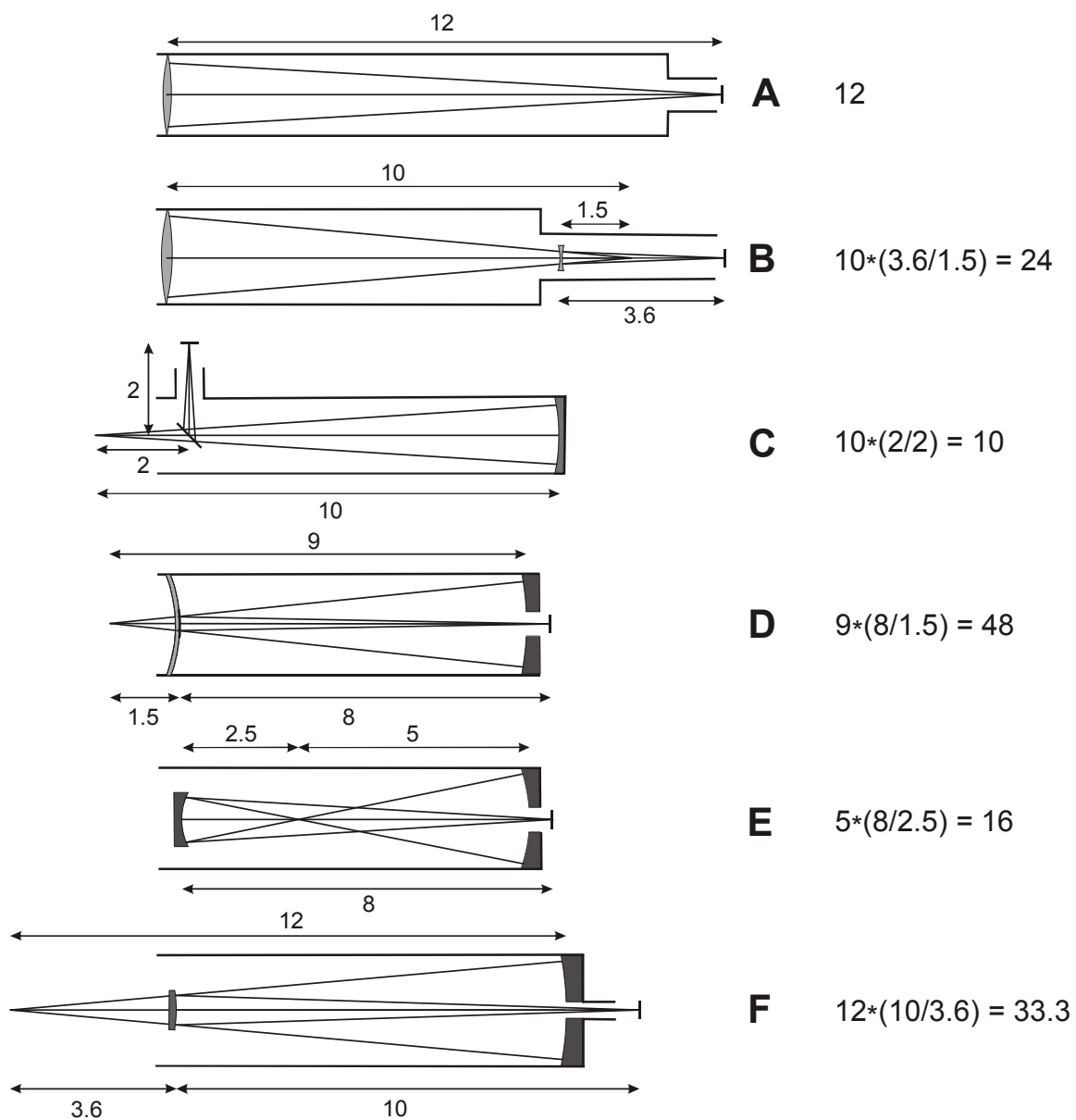


3. Решение. Оптические схемы всех телескопов различаются. Лишь первый из них (А) имеет только одну оптическую деталь – объектив, который напрямую строит изображение объекта в своей фокальной плоскости. Размер этого первичного изображения S_1 есть δF , где δ – угловой размер источника в радианах, F – фокусное расстояние объектива. Во всех остальных случаях данное изображение – действительное или мнимое – переносится на другую плоскость посредством линзы Барлоу (телескоп В) или зеркал различной формы (телескопы С-Е).

Мы знаем, что лучи света проходят через центр линзового объектива, не меняя своего направления. Если же объектив представляет собой зеркало, то от его центра лучи отражаются, как от плоскости, перпендикулярной оптической оси. В обоих случаях размер нового изображения объекта S_E , которое строит этот элемент, будет во столько же раз больше первичного изображения S_1 , во сколько раз оно дальше от этого элемента. В итоге, эквивалентное фокусное расстояние телескопа составит

$$F_E = F (d_2 / d_1),$$

где d_1 и d_2 – расстояния от вторичного элемента до первичного фокуса объектива и до фокальной плоскости телескопа. Нам остается измерить величины F , d_1 и d_2 для всех телескопов на основе изображений лучей света и расставить телескопы в порядке возрастания величины F_E . На рисунке приведены соответствующие величины в относительных единицах:



Ответ на задание: C, A, E, B, F, D.

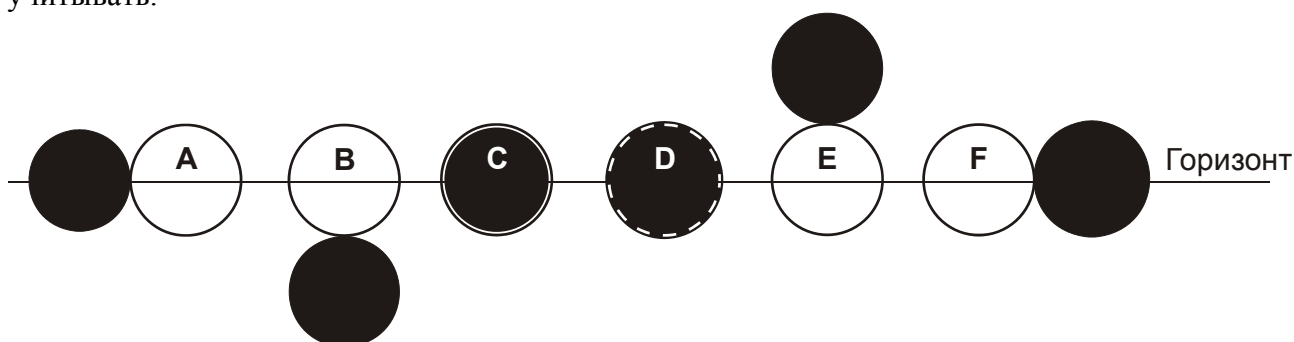
3. Алгоритм оценивания. Система подсчета оценки базируется на вычислении правильных пар в ответе участника, аналогично заданию 1.



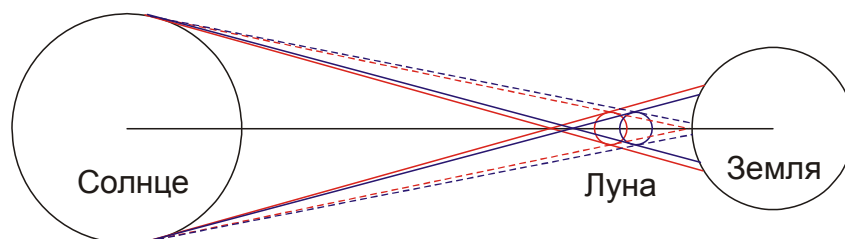
10/11.4. ШЕСТЬ ЛУН ВОКРУГ СОЛНЦА

(О.С. Угольников)

4. Условие. На шести рисунках представлено взаимное расположение дисков Солнца и Луны около горизонта во время некоторых солнечных затмений (в случае D затмение полное, положение Солнца показано пунктиром). Расставьте эти случаи в порядке возрастания наибольшей высоты над горизонтом, на которой в этот момент где-либо на Земле может наблюдаться хотя бы какое-нибудь солнечное затмение (вне зависимости от фазы, от минимальной до максимальной высоты). Орбиту Земли считать круговой, рефракцию не учитывать.

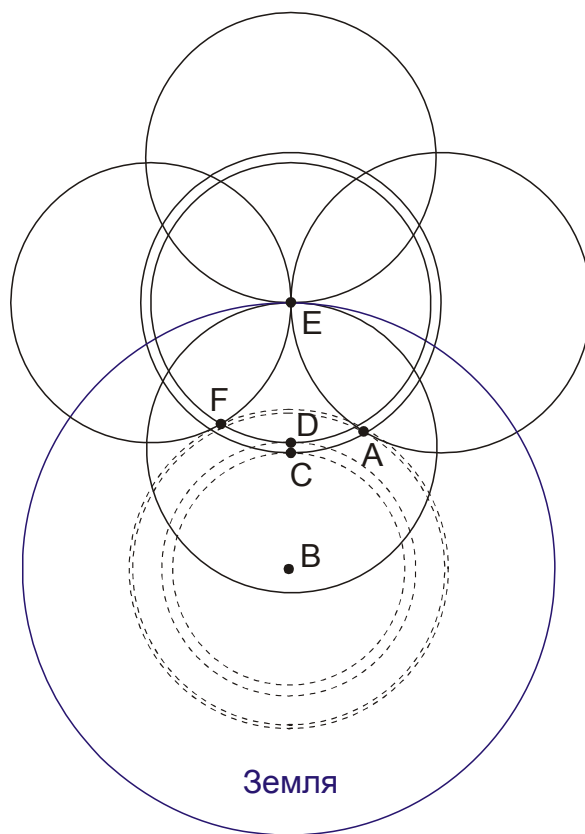


4. Решение. Обратим внимание, что в двух случаях (B и E) видимый диаметр Луны совпадает с видимым диаметром Солнца, в двух случаях (A и C) он меньше солнечного, и Луна располагается вблизи апогея, а еще в двух (D и F) Луна вблизи перигея, и ее угловой размер больше, чем у Солнца. Сам угловой размер Солнца по условию задачи всюду одинаковый. Рассмотрим, что из себя представляют тень и полутень Луны при разных расстояниях Луны от Земли:



Мы видим, что в случае апогея Луны, когда ее угловой диаметр минимальный, полутень на Земле достигает максимальных размеров. Именно она нас будет интересовать в данной задаче, поскольку максимальная высота над горизонтом в пяти из шести случаев будет соответствовать краю полутени и затмению с нулевой фазой. Рассмотрим, как будет располагаться полутень Луны на Земле в ситуациях A-F (рисунок на следующей странице).

В случае E полутень Луны лишь касается Земли, затмение видно только в описанной в условии задачи точке на нулевой высоте. Очевидно, этот случай должен фигурировать в ответе первым. Напротив, в случае B полутень касается диска Земли изнутри. Учитывая, что диаметр полутени близок к двум диаметрам Луны, что больше диаметра Земли, полутень охватит центр видимого с Луны диска Земли, и частное затмение может быть видно в зените. Пункт B должен быть указан в ответе последним.



В случаях С и D на горизонте наблюдается центральное затмение, то есть центр полутени располагается на лимбе Земли. Наибольшая высота над горизонтом будет достигнута на ближайшей к центру диска Земли точке полутени. Так как в случае С радиус полутени больше, соответствующая точка С ближе к центру, и там частное затмение может быть видно на большей высоте, чем в точке D.

В случаях А и F Луна касается Солнца на небе сбоку, что означает перпендикулярность лимба и края полутени на рисунке. В случае А Луна располагается левее Солнца, а ее полутень, если смотреть с Луны – справа от точки лимба. Радиус полутени больше, чем в случае F, и ее край будет расположен ближе к центру диска Земли.

Для полноты картины мы можем добавить, что для обоих случаев центрального затмения (С и D) высота будет больше, чем в случаях А и F. Действительно, разница радиусов полутени в случаях С и D близка к произведению разности соответствующих расстояний до Луны и углового радиуса Солнца $(d_{\text{MAX}} - d_{\text{MIN}}) \cdot \rho$, что не больше 234 км. В случаях А и F центр полутени будет вне Земли, и его расстояние до лимба будет удалено от лимба на расстояние

$$h = \sqrt{R^2 + r^2} - R \approx 900 \text{ км.}$$

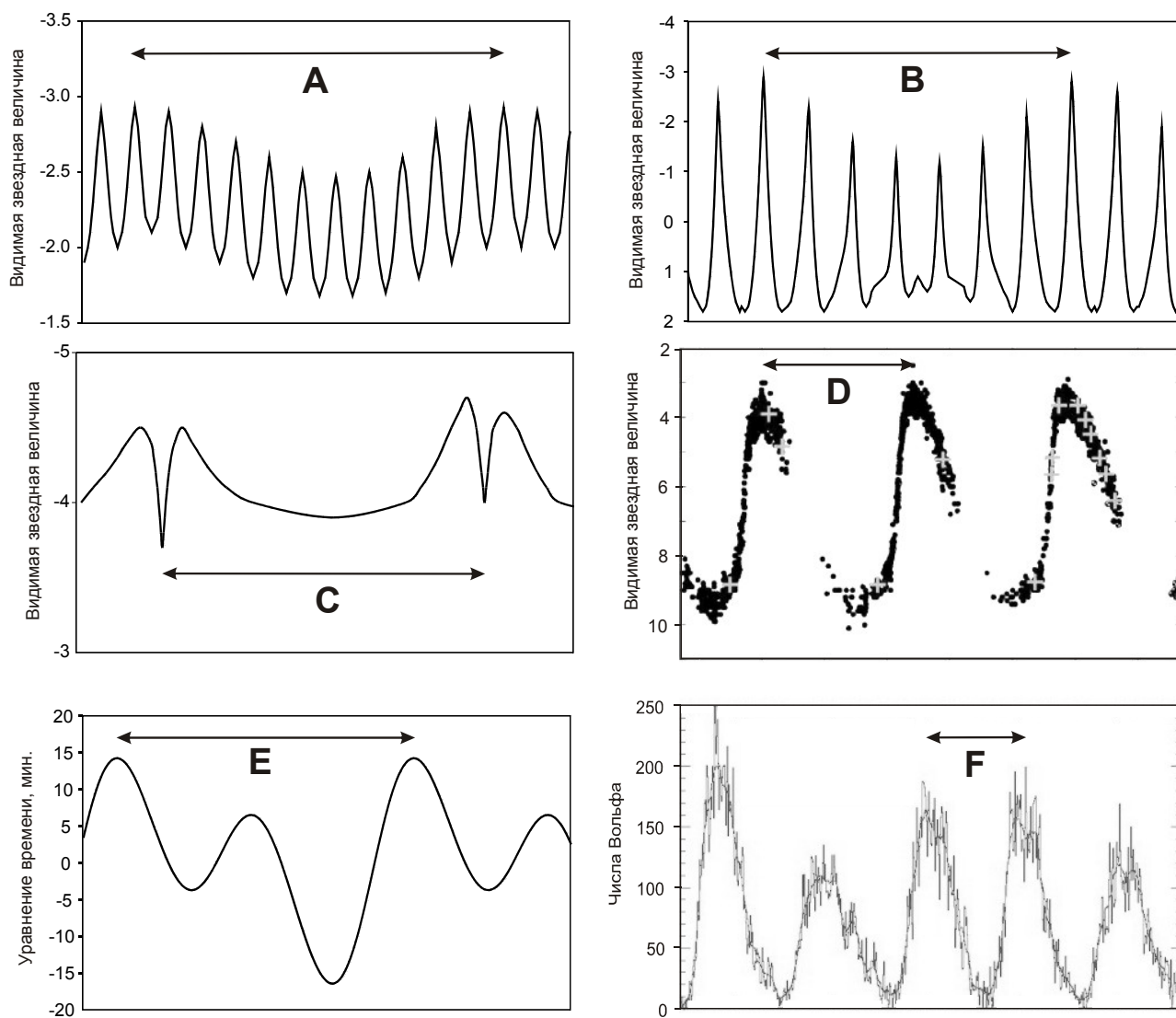
Здесь R и r – радиусы Земли и полутени. Итак, ответ выглядит следующим образом: E, F, A, D, C, B.

4. Алгоритм оценивания. Система подсчета оценки базируется на вычислении правильных пар в ответе участника, аналогично заданию 1.



10/11.5. МАСШТАБЫ ВРЕМЕН (В.Б. Игнатьев)

5. Условие. Перед Вами – графики изменения со временем определенных физических параметров некоторых известных Вам небесных объектов. Масштабы графиков по времени различаются. Расставьте интервалы времени А, В, С, D, E и F по длительности в порядке возрастания, от самого короткого до самого длинного.



5. Решение. Первые три графика показывают нам кривые блеска трех достаточно ярких объектов, они могут быть ярче -2^m . Звезд такой яркости (кроме Солнца, разумеется), к тому же столь сильно переменных, на нашем небе нет. Речь не может идти о кометах, которые в минимуме блеска значительно слабее. Перед нами – кривые блеска ярких планет. В случаях А и В это внешние планеты, причем график В характеризуется большей амплитудой звездных величин и острыми максимумами вблизи противостояний.

Интервал В – промежуток между двумя великими противостояниями Марса, который в данном случае охватывает 7 синодических периодов этой планеты (их может быть и 8). Данный интервал равен примерно 15 годам. График А показывает изменение звездной величины Юпитера, и соответствующий интервал есть 11 его синодических периодов или

практически точно 12 лет. Интересно, что противостояния Юпитера вблизи перигелия, когда он достигает звездной величины -2.9 , такой же, как максимум у Марса, тоже иногда называют великими.

На графике С мы видим острые минимумы блеска, которые характерны для внутренних планет вблизи нижнего соединения, когда их фаза приближается к нулю, а сама планета очень ярка. Интервал С есть синодический период Венеры, 584 дня.

График D также представляет кривую блеска некоторого объекта, причем в данном случае это результаты наблюдений с определенной погрешностью. Большая амплитуда изменений, около 7^m , подсказывает, что речь идет о долгопериодической переменной звезде – мириде. Период изменения блеска мирид близок к одному году, он может быть как больше, так и меньше года. Чтобы определить его, обратим внимание, что в наблюдательных данных видны периодические пропуски. Очевидно, они связаны с моментами соединения звезды на небе с Солнцем, когда наблюдения были невозможны, и отделены одним годом друг от друга. Сам период изменений блеска заметно меньше и составляет около 0.9 года. Перед нами – кривая блеска родоначальницы этого типа переменных звезд – Миры Кита, ее период равен 332 дням.

График E показывает изменение уравнения времени. Этот интервал соответствует полному периоду, который равен 1 году. Обратим внимание, что это больше интервалов D, но меньше интервала С. Наконец, на графике F представлены периодические изменения солнечной активности. Их период хорошо известен и составляет около 11 лет.

Ответ на задание: D, E, C, F, A, B.

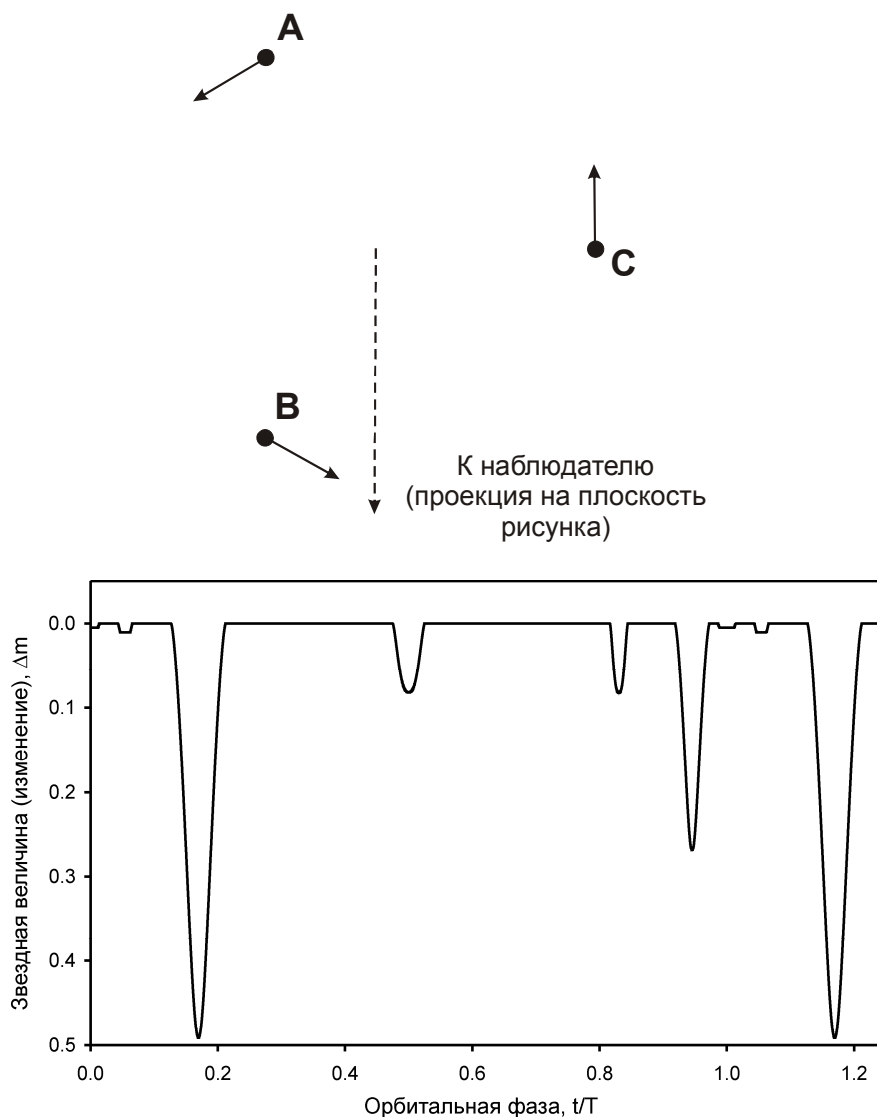
5. Алгоритм оценивания. Система подсчета оценки базируется на вычислении правильных пар в ответе участника, аналогично заданию 1.



10/11.6. МУЛЬТИЗАТМЕННАЯ СИСТЕМА

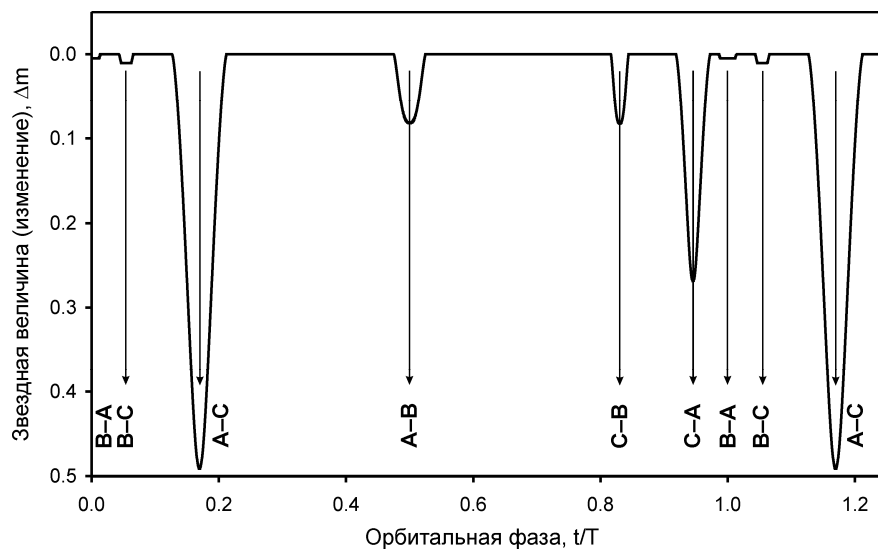
(О.С. Угольников)

6. Условие. Затменная система состоит из трех звезд одинаковой массы. Они движутся в одной плоскости так, что их центры всегда образуют равносторонний треугольник. Перед Вами – кривая блеска этой системы, по оси абсцисс отложена орбитальная фаза F (время, деленное на орбитальный период). Известно, что при фазе $F=0$ положения звезд и направления их скоростей соответствуют рисунку ниже. На этом рисунке также показана проекция направления к наблюдателю на плоскость орбит звезд. Расставьте звезды А, В и С в порядке возрастания их радиусов (от самой маленькой до самой большой) в клетках 1-3 и в порядке возрастания эффективных температур (от самой холодной до самой горячей) в клетках 4-6 на листе ответов. Считать звезды сферическими, потемнением их дисков к краю и эффектами отражения света пренебречь.

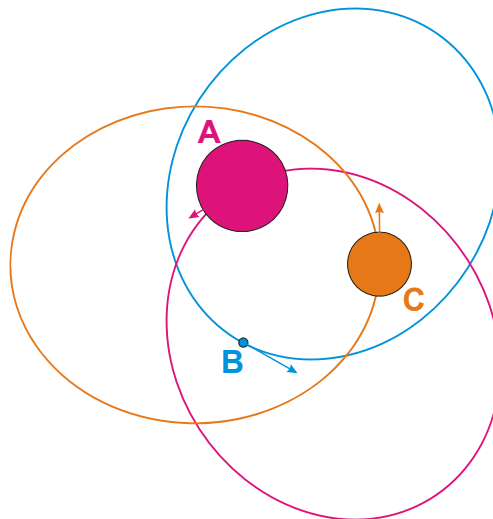


6. Решение. Обратим внимание, что шесть минимумов блеска системы, наступающих в течение орбитального периода, отделены друг от друга разными интервалами времени. Этого бы не происходило при круговых орбитах звезд – затмения случались бы строго через каждые $1/6$ орбитальной фазы, при повороте каждой из звезд по своей орбите на 60° .

Следовательно, орбиты в системе эллиптические. При этом они находятся в одной плоскости, имеют одинаковые большие полуоси и эксцентриситеты, звезды одновременно проходят перицентры и апоцентры. Из рисунка мы знаем направления движения звезд, что позволяет нам обозначить, какие звезды участвуют в каждом из 6 затмений периода:



Обратим внимания, что моменты середин минимумов симметричны относительно фазы 0 (звезда В затмевает звезду А, рисунок) и фазы 0.5 (обратная ситуация, звезда А затмевает звезду В). Это означает, что данные моменты соответствуют прохождению звездами перицентров и апоцентров орбит, причем фаза 0 соответствует именно перицентру (рисунок ниже), так как там угловые скорости звезд выше, и следующие минимумы наступают быстрее.



Сравним минимумы при фазах 0 и 0.5, в которых участвуют звезды А и В. Первый из них имеет плато, то есть звезда В полностью вступает на диск звезды А либо же, наоборот, полностью закрывает его. А через полпериода мы видим лишь частичное затмение без плато. Это связано с тем, что фаза 0.5 соответствует апоцентру, пространственное расстояние между звездами А и В и угловое расстояние между ними больше, чем при фазе 0, в перигеетре. Большая длительность затмения в фазе 0.5 связана с меньшими угловыми скоростями звезд.

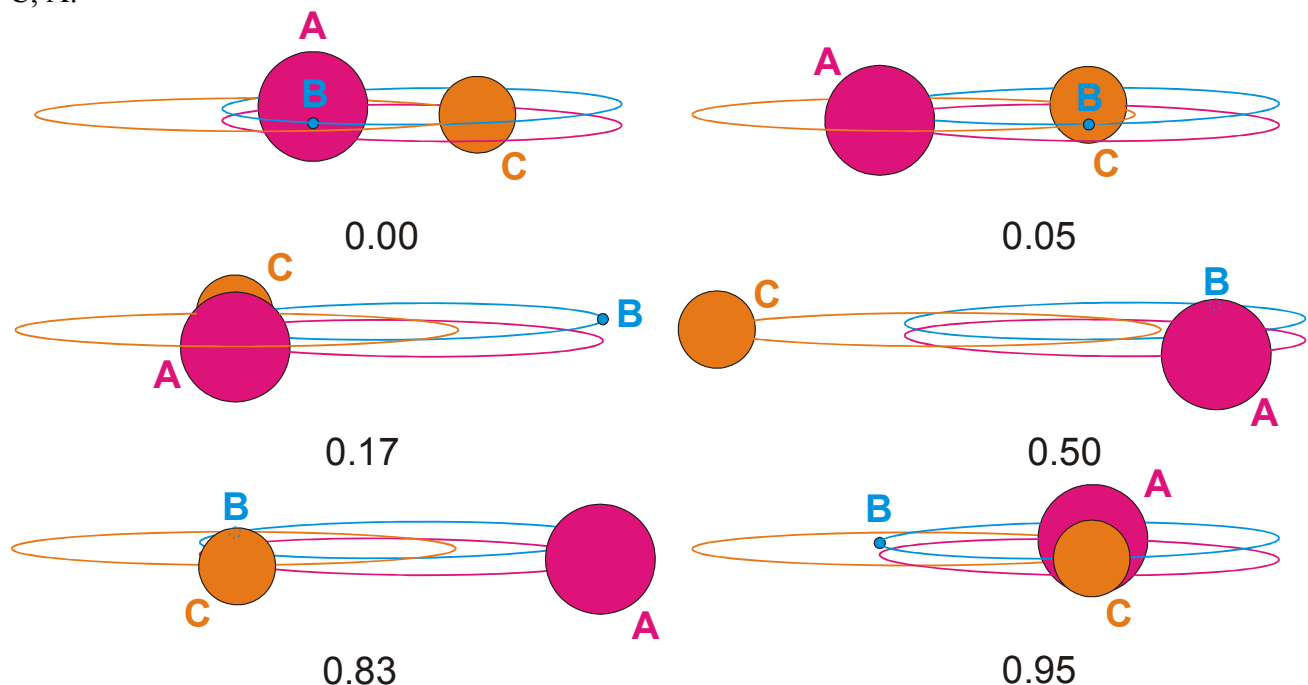
Затмеваемая угловая площадь звезды В при частном затмении в фазе 0.5 меньше, чем затмеваемая площадь звезды А при фазе 0. Тем не менее, падение блеска при фазе 0.5

существенно выше, чем при фазе 0. Следовательно, звезда В горячее звезды А. Аналогичный вывод мы можем сделать, сравнивая кратковременное полное (или кольцеобразное) затмение звезды С звездой В в фазе 0.05 и обратное частное затмение звезды В звездой С в фазе 0.83. Звезда В горячее звезды С и, таким образом, оказывается самой горячей звездой во всей системе.

Затмение звезды С звездой А происходит при фазе 0.17, то есть дальше от перицентра, чем обратное затмение (фаза 0.95), и площадь перекрытия звезд там меньше. Тем не менее, падение блеска при фазе 0.17 больше, чем при фазе 0.95. Следовательно, звезда С горячее звезды А. По возрастанию температуры звезды нужно расставить следующим образом: А, С, В.

Чтобы сравнить размеры звезд, обратим внимание, что звезда А, затмевая звезду С при фазе 0.17, вызывает существенно большее падение блеска, чем это же делает звезда В при фазе 0.05, хотя последняя делает это ближе к перицентрам орбит. Следовательно, звезда А больше звезды В по размерам. Аналогичный вывод делается на основе затмений звезды А звездами С (фаза 0.95) и В (фаза 0 или 1). Звезда С также больше звезды В.

Горячая и маленькая звезда В проходит перед дисками звезд А и С при фазах 0 и 0.05. Первое из этих прохождений происходит в перицентре, но продолжается дольше, что указывает на большие размеры звезды А по сравнению со звездой С. Тот же вывод можно сделать на основе частных затмений маленькой горячей звезды В звездами А и С. Первое из них происходит прямо в апоцентре, при максимальном угловом расстоянии между центрами звезд в момент максимального затмения. Тем не менее, мы наблюдаем такое же падение блеска, как при затмении звездой С при фазе 0.83, что указывает на большой угловой размер звезды А. Итак, звезды располагаются в порядке увеличения радиуса следующим образом: В, С, А.



Окончательный ответ на задание: В, С, А, А, С, В.

В таблице приведены параметры системы, используемой для построения модели:

Перицентрическое расстояние (отн. ед. расст.)	1.0	
Эксцентриситет орбит	0.5	
Наклонение плоскости орбит	5°	
Характеристики звезд:	Радиус (отн. ед. расст.)	Температура (отн. ед. темп.)
Звезда А	0.50	1.0
Звезда В	0.05	2.0
Звезда С	0.35	1.2

6. Система оценивания. Задание состоит из двух независимых частей, в каждой из которых звезды А, В и С нужно расположить в определенной последовательности. Аналогично предыдущим заданиям, в каждом из двух случаев подсчитывается число правильных пар, которое может быть от 0 до 3. Пропуски и повторы букв обрабатываются аналогично предыдущим заданиям. Число баллов, выставаемых за каждое из двух частей задания, определяется следующим образом:

N	Баллы	N	Баллы
0	0	2	1
1	0	3	2

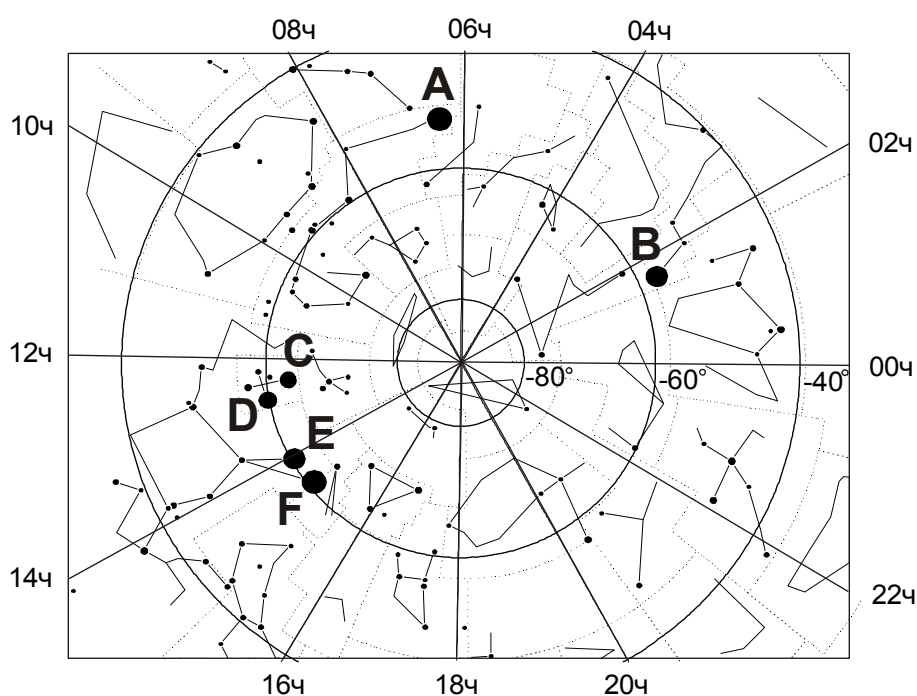
Итоговая оценка определяется суммой оценок, полученных за каждое из частей задания. Если хотя бы одна из частей была решена верно (за нее стоит 2 балла), к сумме добавляется еще 1 балл. Таким образом, максимальная оценка за все решение равна $2+2+1 = 5$ баллов.

Компенсационный балл выставляется, если оба ответа на задания записаны в обратном порядке (или, то же самое, ответы за первую и вторую часть задания переставлены местами): А, С, В, В, С, А.



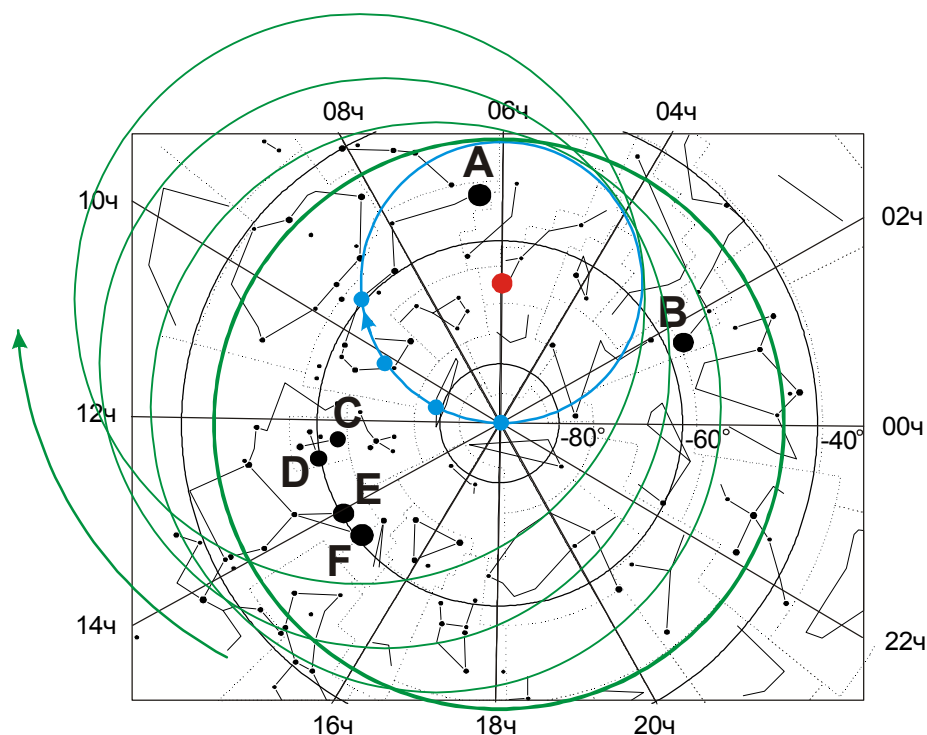
10/11.7. МЫ ВСТРЕТИМСЯ... (О.С. Угольников)

7. Условие. Перед Вами карта южной полярной области неба, на которой нанесена экваториальная координатная сетка на эпоху 2000 года. На карте отмечены шесть ярчайших звезд южного неба, невидимые в настоящее время на территории России: Канопус (α Киля, А), Ахернар (α Эридана, В), Акрукс (α Южного Креста, С), Мимоза (β Южного Креста, D), Хадар (β Центавра, E) и Ригель Кентаврус (Толиман, α Центавра, F). Расположите эти звезды по времени ближайшего будущего появления над горизонтом в южных районах России (широта $+45^\circ$), от самого раннего до самого позднего. Если среди этих звезд есть такие, которые вообще не появятся на этой широте, поставьте их в конце в произвольном порядке. Собственным движением звезд и атмосферной рефракцией пренебречь, угол наклона экватора Земли к эклиптике считать постоянным.



7. Решение. Мы не учитываем собственное движение звезд, поэтому их экваториальные координаты изменяются только за счет эффекта прецессии оси вращения Земли. Это явление сводится к вращению южного полюса мира вокруг южного полюса эклиптики (координаты $6^{\text{ч}}, -66.6^\circ$) с периодом около 26000 лет. Изобразим это на карте (следующая страница).

Южный полюс эклиптики обозначен красным кружком. Траектория движения южного полюса мира показана синим кругом, показано его текущее положение и три положения в будущем, разделенные интервалами в 2000 лет. Отметим, что карта приведена в проекции с увеличением радиального масштаба по краям, поэтому путь полюса мира не является на ней в точности кругом, но это не влияет на решение задачи. Необходимо отметить, что смещение полюса мира на южном небе будет происходить по часовой стрелке.



Жирной зеленой линией показана текущая небесная параллель со склонением -45° , то есть граница видимости неба на широте $+45^\circ$ в настоящее время. В будущем эта линия будет смещаться так, что ее центр будет оставаться в полюсе мира, то есть на синем круге. Построим приблизительные границы видимости для широты $+45^\circ$ в будущем, также отделенные интервалами в 2000 лет.

По зеленым линиям мы видим, как будет изменяться условия видимости звезд в будущем. Первым через эту границу перейдет звезда Ахернар (B). Через некоторое время через нее последовательно пройдут расположенные недалеко друг от друга звезды Ригель Кентаврус (F), Хадар (E), Мимоза (D) и Акрукс (C). А вот Канопус (A), расположенный недалеко от южного полюса эклиптики, внутри синего круга, никогда не окажется видимым на широте $+45^\circ$. Более того, именно сейчас его склонение (-52°) близко к максимальному, дальше Канопус будет еще ближе к южному полюсу мира.

Правильный ответ на задание: B, F, E, D, C, A.

В таблице приведены реальные годы ближайшего пересечения звездами параллели со склонением -45° как без учета, так и с учетом их собственного движения. Отметим, что собственное движение сильно влияет на ситуацию только у ближайшей к Солнцу звезды α Центавра, из-за него она появится на небе широты $+45^\circ$ позже звезды β Центавра.

Звезда	Год появления над горизонтом на широте $+45^\circ$	
	Без учета собств. движения	С учетом собств. движения
Ахернар (B)	4770	4782
Ригель Кентаврус (F)	9403	$\sim 10700^*$
Хадар (E)	10045	10060
Мимоза (D)	11615	11640
Акрукс (C)	12307	12329
Канопус (A)	—	—

* упрощенный расчет в предположении постоянства собственного движения.

7. Алгоритм оценивания. Система подсчета оценки базируется на вычислении правильных пар в ответе участника, аналогично заданию 1, с исключением в процедуре выставления компенсационных баллов. Они выставляются не за обратную запись букв, а за вариант решения, при котором прецессия происходит в обратном направлении, против часовой стрелки (что аналогично взгляду в прошлое вместо будущего). Как мы можем видеть, пересечение небесной параллели -45° сразу четырьмя звездами (Акруksom, С, Мимозой, D, Хадаром, Е, и α Центавра, F) происходят в близкое время, и расположить их правильно в рамках используемой графической модели достаточно трудно. Однако мы можем видеть, что пересечение этой параллели Ахернаром (В) будет отделено большим интервалом времени, а Канопус (А) на широте $+45^\circ$ не взойдет. 2 компенсационных балла выставляются за любой ответ без повторов, в котором предпоследнем месте будет звезда В, а на последнем – А, если общий алгоритм для этого ответа дает менее 2 баллов. Очередность букв С, D, Е и F на первых четырех местах в этом случае роли не играет.