

## Метод Рёмера (независимое исследование)

### 1. Аннотация

В данной статье выполнены расчёты скорости света методом Рёмера, на основе наблюдений Рёмера. Также выполнены расчёты скорости света методом Рёмера, на основе таблиц затмений спутника Юпитера Ио 1994-95 годов [3]. И те и другие проверочные расчёты с хорошей точностью подтверждают результат, полученный Рёмером: «для преодоления расстояния, равного диаметру земной орбиты свету требуется 22 минуты». Что соответствует скорости света, примерно: 227 000 км/с. Этот результат далёк от общепринятого значения скорости света в вакууме (300 000 км/с) измеренного на поверхности Земли.

Результаты проверки позволяют объяснить это существенное расхождение в скоростях света (227 000 и 300 000) различными параметрами и свойствами среды у поверхности Земли и на значительном удалении от поверхности Земли и Солнца.

### 2. Введение

Скорость света, вычисленная Рёмером, существенно отличается от современных данных. Согласно Рёмеру, свет преодолевает расстояние равное диаметру земной орбиты, за 22 минуты. Если принять радиус земной орбиты, согласно измерениям Д. Кассини, равным 140 млн. км., то скорость света составит 212 000 км/с. Если же взять современное значение астрономической единицы 149,6 млн. км., то скорость света по Рёмеру составит 227 000 км/с.

Согласно современным представлениям свету для преодоления диаметра земной орбиты требуется 16 минут 38 секунд, что соответствует скорости света 300 000 км/с.

В справочниках и учебных пособиях расхождение это принято замалчивать. Там просто утверждают, что Рёмер получил значение скорости света примерно равное 300 000 км/с.

Верное значение скорости света, полученное Рёмером, можно найти в первоисточниках [1, 2], в Википедии, а также в исторической и научно-популярной литературе [4, 5, 6, 7]. Но в последнем случае, расплачиваясь за объективное изложение исторических фактов, авторы литературных источников вынуждены как-то объяснять существенную разницу между результатом, полученным Рёмером (227 000 км/с) и сегодняшним общепринятым значением скорости света в вакууме, примерно: 300 000 км/с., что на 32% превышает значение полученное Рёмером.

Эту разницу можно было бы объяснить различными свойствами среды, в которой распространяется свет. Но авторы упомянутых источников [4, 5, 6, 7] придерживаются постулата о постоянстве скорости света в вакууме, и поэтому, прямо или косвенно, объясняют расхождение между результатом Рёмера и общепринятым значением скорости света грубой ошибкой Рёмера. Тем самым, они принижают значение открытия Рёмера и оставляют за ним приоритет лишь в определении скорости света по порядку величины.

В пользу версии о грубой ошибке Рёмера в литературе приводятся сведения о том, что Рёмер, якобы, не привёл исходные данные и формулу расчёта, из которых он получил 22 минуты.

В пользу этой же версии высказывается мнение, что первое сообщение об определении скорости света [1] подготовлено к печати не Рёмером, а репортёром, который якобы не понял большую часть доклада Рёмера.

В развитие этой же темы сообщается, что Гюйгенс, ознакомившись с открытием Рёмера, попросил у Рёмера дополнительных объяснений [4]. Это так, но зато, разобравшись в проблеме, Гюйгенс в дальнейшем не оспаривал значение, полученное Рёмером (22 минуты) и использовал это значение в своей работе «Трактат Люмьер».

Ньютон занимал непоследовательную позицию по отношению к результату, полученному Рёмером. Так в первой публикации «Начал» в 1686 году он указал значение 22 минуты, но в 1704 году в «Оптике» он даёт значение скорости света: 1 А.е. за 8 минут (что соответствует скорости 312 000 км/с). Во второй публикации «Начал» в 1713 году он также даёт значение: 1 А.е. за 8 минут.

Рёмер с недоумением отнёсся к результату вычислений Ньютона, но в связи с занятостью не нашёл времени чтобы доказать свою правоту, а в 1710 году умер [4].

Джеймс Брайдлей в 1726-28 годах, измерив видимое отклонение звёзд от своего положения на небесной сфере, нашёл, что расстояние от Солнца до Земли свет способен пройти за 8 минут 13 секунд, что соответствует скорости 304 000 км/с. Его результат, на первый взгляд, вроде бы, указывает на ошибку Рёмера. Но здесь следует иметь в виду, что Брайдлей определил скорость света как мгновенную скорость непосредственно у поверхности Земли, где параметр  $g$  гравитационного поля равен  $9,81 \text{ м/с}^2$  и где, как показывают опыты, гравитационное поле Земли обладает изотропными свойствами по отношению к направлению распространения света. В то время как Рёмер определил скорость света как среднее значение на участке пути, где параметр  $g$  гравитационного поля Солнца равен  $0,005 \text{ м/с}^2$  и где гравитационное поле анизотропно, вследствие существенного удаления измерительного участка пути света от Солнца, Земли и всех других больших гравитирующих масс, см. приложение: *Расчёты по методу Рёмера*.

В 1809 году астроном Жан Батист Деламбре, повторив наблюдения Рёмера, нашёл, что свет должен пройти от Солнца до Земли за 8 минут 12 секунд (т.е. со скоростью, примерно: 304 000 км/с) [4]. Этот результат также, вроде бы, говорит в пользу версии об ошибке Рёмера, но, не ознакомившись подробно с методом расчёта Деламбре, такой вывод делать нельзя.

Имеются и другие, более поздние публикации, где приводятся вычисления скорости света якобы методом Рёмера, но на самом деле искажающие этот метод, с целью получения значений близких к 300 000 км/с.

В литературе можно найти два основных способа искажения метода Рёмера. Это заведомо не верный расчёт дополнительного пути, например расчёт дополнительного пути, пройденного светом, по схеме с неподвижным Юпитером (пример такого расчёта см. в приложении п. 3) и заведомо не верный расчёт дополнительного времени.

К настоящему времени конкретных ошибок в методике Рёмера не найдено, но сложилось мнение, что такие ошибки должны быть.

Для того чтобы развеять это предвзятое мнение ещё раз рассмотрим метод Рёмера и самостоятельно оценим достоинства и недостатки этого метода.

### 3. Результаты исследования

Для знакомства с методом Рёмера, приведём отрывок из его первого сообщения (1676 г.) [1]. Рисунок 1 во всех существенных деталях соответствует рисунку, приведенному в первом сообщении Рёмера.

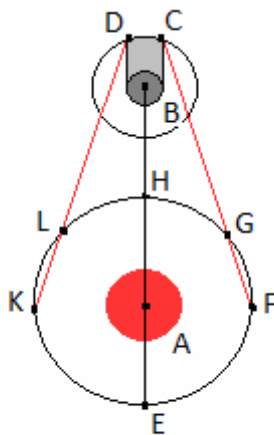


Рис. 1

«Пусть,  $A$  (см. Рис.1) будет Солнце,  $B$  – Юпитер,  $C$  – первый спутник Юпитера, который входит в тень планеты; он выходит из неё в точке  $D$ ; пусть,  $EFGHLK$  – положение Земли на различных расстояниях от Юпитера.

Теперь предположим, что с Земли, находящейся в точке  $L$ , виден первый спутник в момент его выхода из тени в точке  $D$ ; примерно 42,5 часа спустя (то есть, после одного оборота этого спутника) с Земли, находящейся в точке  $K$ , виден спутник, возвратившийся в точку  $D$ .

Ясно, что, если свету требуется время, чтобы пройти расстояние  $LK$ , спутник будет виден возвратившимся в точку  $D$  позже, чем если бы Земля по прежнему находилась в точке  $L$ »

Отсюда уже видно, что расчёт Рёмера заключался в следующем:

- определялось время запаздывания выхода спутника из тени  $\Delta t$  ;

- определялся дополнительный путь, пройденный светом, в первом приближении, это хорда  $LK$  ;

- и определялась скорость света  $c$  из выражения:

$$c = \frac{LK}{\Delta t} \quad (1)$$

Из схемы (рис. 1) также видно, что скорость света можно определять и на участке пути  $FG$  , по времени опережения затмения спутника.

Для того чтобы определить время запаздывания выхода спутника из тени, необходимо знать истинный период обращения спутника, который равен периоду обращения, измеренному во время противостояния, когда Земля и Юпитер движутся параллельно друг другу. Также истинный период обращения равен среднему периоду обращения спутника, вычисленному по результатам наблюдения за спутником на участках орбиты Земли, расположенных симметрично относительно линии противостояния:  $A - H - B$  .

Основным недостатком схемы, представленной на рис.1, является то, что на ней не отражено перемещение Юпитера за время перемещения Земли из точки  $L$  в точку  $K$  и из точки  $F$  в точку  $G$  . Между тем, окружная скорость Юпитера составляет примерно 44% от окружной скорости Земли и поэтому пренебрегать перемещением Юпитера нельзя. То есть, схема представленная на рисунке 1, не годится для проведения точных расчётов. По-видимому, Рёмер привёл эту схему лишь для пояснения принципа расчёта, а при выполнении расчётов пользовался более подробной схемой.

### 3.1. Определение скорости света по наблюдениям Рёмера

Вопреки мнению оппонентов, Рёмер опубликовал достаточно полные исходные данные для выполнения расчёта по определению скорости света, а именно:

В своём первом сообщении [1] Он приводит значение задержки выхода спутника Юпитера из тени (10 мин.), указывает, что задержка времени измерялась на участке движения Земли, соответствующем 40 обращениям спутника и упоминает, что отсчёт времени начался в августе. Он также указывает, что наблюдения завершились вечером 9 ноября в 5 часов 35 минут 45 секунд.

Поскольку это время выхода спутника из тени после 40-го обращения, следовательно, легко рассчитать, что начальная засечка времени была сделана 30 августа.

Из другой статьи Рёмера, также опубликованной в Журнале « Scavans» [4], следует, что наблюдения за первым спутником Юпитера проводились также 7, 14 и 23 августа. Эти наблюдения Рёмер использовал для определения истинного периода обращения, о чём он упоминает в своём первом сообщении.

Наблюдение 7 августа проводилось во время противостояния, предвещающего великое противостояние. Расстояние от Земли до спутника Юпитера во время противостояния 1676 года составляло, примерно 4,0455 А.е.

Отсюда можно рассчитать, что 30-го августа наблюдалось 13-е обращение спутника Юпитера, считая от линии противостояния.

Этих данных вполне достаточно, чтобы вычертить в масштабе расчётную схему, см. рис. 2, учесть в ней перемещение Юпитера и подтвердить полученный Рёмером результат.

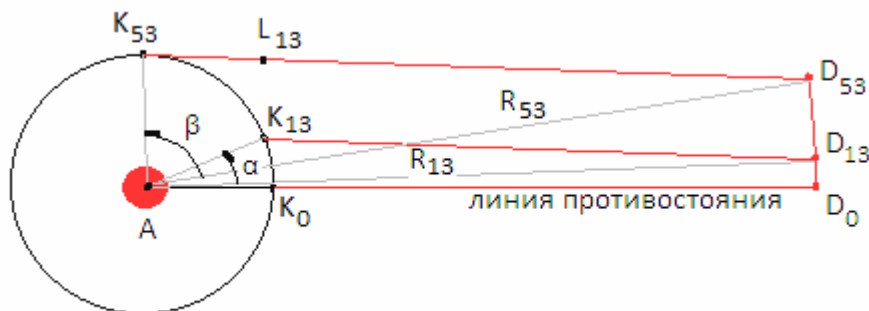


Рис. 2

На рисунке 2 приняты следующие обозначения:

$A$  – солнце;

$K_0, K_{13}, K_{53}$  - точки наблюдения на земной орбите за выходом из тени спутника Юпитера Ио: в противостоянии, после 13-го обращения и после 53-го обращения, соответственно;

$D_0, D_{13}, D_{53}$  - точки, обозначающие спутник Юпитера выходящий из тени: в противостоянии (после нулевого обращения), после 13-го обращения, после 53-го обращения, соответственно;

$R_{13}, R_{53}$  - расстояния до спутника Юпитера после 13 и 53 обращения, соответственно. При данном масштабе изображения орбита Юпитера сливается с эфемеридами спутника, появляющегося из тени (красная дуга  $D_0 D_{13} D_{53}$ ).

$D_{13}K_{13}$  - путь, пройденный светом, отражённым от спутника Юпитера, выходящим из тени, после 13-го обращения, считая от линии противостояния;

$D_{53}K_{53}$  - путь, пройденный светом, отражённым от спутника Юпитера, выходящим из тени после 53-го обращения.

Дополнительный путь, пройденный светом, из-за перемещения Земли из точки  $K_{13}$  в точку  $K_{53}$ , равен разности отрезков:  $D_{53}K_{53}$  и  $D_{13}K_{13}$ , то есть, равен отрезку:  $L_{13}K_{53}$ . Этот отрезок может быть построен графически.

Но задача определения дополнительного пути может быть решена и более точным аналитическим путём, см. приложение п. 1.

Согласно прилагаемому расчёту дополнительный путь, пройденный светом, составил: 0,9062 А.е. Согласно наблюдениям и вычислениям Рёмера, на прохождение этого дополнительного пути свету понадобилось 10 минут. Следовательно, для того чтобы преодолеть путь равный диаметру

земной орбиты (2 А.е.) свету понадобится 22,07 минуты ( $\frac{2 \cdot 10}{0,9062} = 22,07$ ), то есть, приблизительно, 22

минуты. Что соответствует скорости света: **227 000 км/с**.

Проведенный расчёт подтверждает результат опубликованный Рёмером.

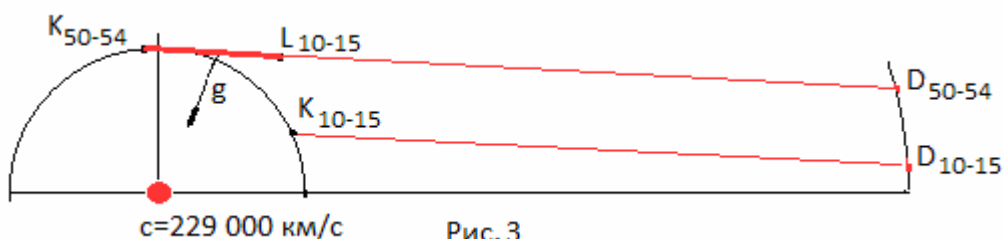
Но, для того чтобы исключить все сомнения в надёжности метода Рёмера, были проведены вычисления, на основе табличных значений затмений спутника Юпитера 1994-1995 годов [3], см. приложение п. 2.

### 3.2. Определение скорости света на основе табличных значений затмений спутника Юпитера 1994-95 годов.

По результатам прилагаемого расчёта с использованием таблиц [3] дополнительный путь  $L_{13}K_{53}$ , пройденный светом, составил: 0,9132 А.е., а дополнительное время, затраченное светом на прохождение дополнительного пути, составило 10 минут.

Следовательно, на прохождение расстояния, равного диаметру земной орбиты (2 А.е.) свет затратил:  $\frac{10 \cdot 2}{0,9132} = 21,90$  минуты

Для того чтобы уменьшить влияние погрешностей таблиц [3] на результаты расчётов, были проведены расчёты для нескольких измерительных участков, с последующим усреднением полученных результатов, см. рис. 3



На рисунке приняты следующие обозначения:

$D_{10-15}; D_{50-54}$  - спутник Юпитера Ио, выходящий из тени после 10-15 и 50-54 обращений, соответственно;

$K_{10-15}$ ;  $K_{50-54}$ , - точки наблюдения на земной орбите за спутником Юпитера, выходящим из тени;

$L_{10-15}K_{50-54}$  - дополнительный (измерительный) участок пути (пучок дополнительных участков), состоящий из двенадцати примерно одинаковых участков:  $L_{13}K_{53}$ ,  $L_{10}K_{50}$ ,  $L_{11}K_{51}$ ,  $L_{12}K_{52}$ ,  $L_{14}K_{53}$ ,  $L_{15}K_{53}$ ,  $L_{11}K_{53}$ ,  $L_{11}K_{52}$ ,  $L_{10}K_{52}$ ,  $L_{10}K_{51}$ ,  $L_{14}K_{54}$ ,  $L_{15}K_{54}$ ;

$g$  - средний вектор ускорения на Солнце на дополнительном участке пути.

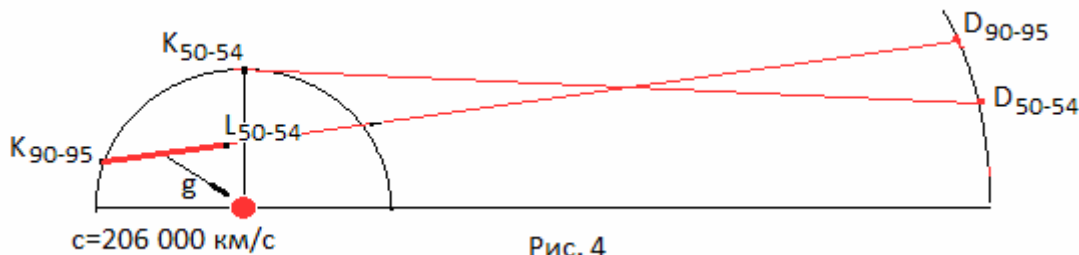
Вектор ускорения, направлен под острым углом к направлению распространения света на дополнительном участке пути. Проекция вектора  $g$  на дополнительный участок пути направлена в сторону распространения света.

Для этих двенадцати дополнительных участков, среднее время необходимое свету для преодоления расстояния, равного диаметру орбиты Земли составило: 21,80 минут +1,56 -1,32 минут (+7,1 -6,1%). Что эквивалентно скорости света: **229 000 км/с**, см. приложение п. 2. 1.

Этот результат хорошо соответствует результату Рёмера, также полученному при измерении скорости света на основе наблюдений за спутником Юпитера, в первой четверти земной орбиты.

Выполним ещё несколько расчётов для того, чтобы выявить зависимость скорости света от среднего абсолютного значения параметра  $g$  на дополнительных участках пути и от направления среднего вектора  $g$ .

### 3.2.1. Определение скорости света по результатам наблюдений, за: 53 и 95; 50 и 90; 50 и 91; 50 и 92; 50 и 93; 50 и 94; 50 и 95; 54 и 94; 54 и 95; 53 и 94; 52 и 94; 51 и 93, обращениями спутника Юпитера, см. рис. 4.



На рисунке, отрезок  $L_{50-54}K_{90-95}$  обозначает пучок дополнительных (измерительных) участков, состоящий из двенадцати участков:  $L_{53}K_{95}$ ,  $L_{50}K_{90}$ ,  $L_{50}K_{91}$ ,  $L_{50}K_{92}$ ,  $L_{50}K_{93}$ ,  $L_{50}K_{94}$ ,  $L_{50}K_{95}$ ,  $L_{54}K_{94}$ ,  $L_{54}K_{95}$ ,  $L_{53}K_{94}$ ,  $L_{52}K_{94}$ ,  $L_{51}K_{93}$ .

$g$  - средний вектор ускорения на Солнце на дополнительном участке пути.

Вектор  $g$  направлен под тупым углом к направлению распространения света. Проекция вектора  $g$  на дополнительный участок пути направлена в сторону противоположную распространению света, что, по-видимому, приводит к уменьшению скорости света.

Для этих двенадцати измерительных участков расположенных во 2-й четверти, среднее время необходимое свету для преодоления расстояния равного диаметру земной орбиты, составило: **24,24 минуты** +1,17 -1,32 мин. (+4,8 -5,4%). Это соответствует скорости света: **206 000 км/с**, что значительно меньше, чем в предыдущем случае, см. приложение п. 2.2

Сравнивая полученный результат с предыдущим можно заключить, что гравитационное поле Солнце на значительном удалении от его поверхности обладает анизотропными свойствами, а именно: в зависимости от угла между вектором  $g$  и направлением скорости света, гравитационное поле Солнца ускоряет или замедляет процесс распространения света.

**3.2.2. Определение скорости света по результатам наблюдений, за: 31 и 68; 32 и 67; 33 и 66; 34 и 65; 35 и 64, - обращениями спутника Юпитера, см. рис. 5**

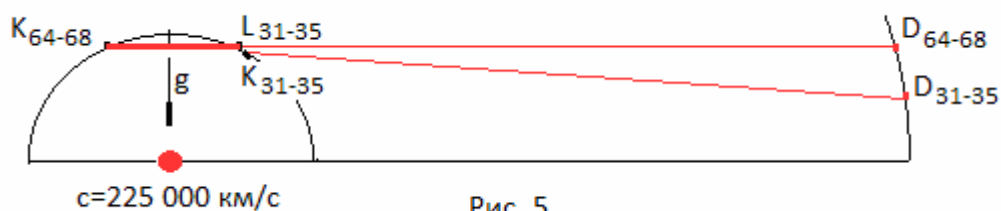


Рис. 5

На рисунке, отрезок  $L_{31-35}K_{64-68}$  обозначает пучок дополнительных участков, состоящий из пяти однотипных участков:  $L_{32}K_{68}$ ,  $L_{32}K_{67}$ ,  $L_{33}K_{66}$ ,  $L_{34}K_{65}$ ,  $L_{35}K_{64}$ .

$g$  - средний вектор ускорения на Солнце на дополнительном участке пути, который на каждом из дополнительных участках пути, направлен перпендикулярно к дополнительному участку.

Начальные и конечные точки наблюдения подобраны таким образом, чтобы каждый дополнительный участок пути был примерно равен хорде, по которой луч пересекает орбиту Земли. Отклонения не превышают 1%. Это обстоятельство и обуславливает перпендикулярное направление вектора  $g$  по отношению к направлению распространения света.

Для этих пяти измерительных участков, среднее время необходимое свету для преодоления расстояния равного диаметру земной орбиты, составило: **22,17 минуты** +0,57 -0,45 мин (+2,6 -2%). Что соответствует скорости света: **225 000 км/с**, то есть имеет промежуточное значение между скоростями света, на рассмотренных выше участках, см. приложение п.2.3.

**3.2.3. Определение скорости света по результатам наблюдений, за: 18 и 83; 19 и 82; 20 и 81; 21 и 80; 22 и 79, обращениями спутника Юпитера, см. рис. 6.**

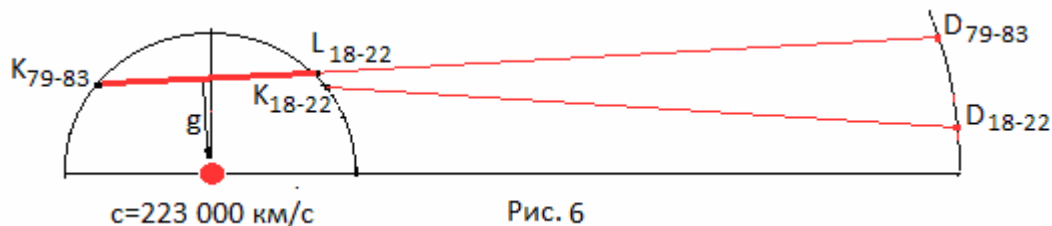


Рис. 6

На рисунке, отрезок  $L_{18-22}K_{79-83}$  обозначает пучок, состоящий из пяти однотипных дополнительных (измерительных) участков:  $L_{18}K_{83}$ ,  $L_{19}K_{82}$ ,  $L_{20}K_{81}$ ,  $L_{21}K_{80}$ ,  $L_{22}K_{79}$ . Начальные и конечные точки наблюдения подобраны таким образом, чтобы каждый дополнительный участок был примерно равен хорде, по которой луч пересекает орбиту Земли.

$g$  - средний вектор ускорения на Солнце на дополнительном участке пути, который на каждом дополнительном участке пути, направлен перпендикулярно дополнительному участку пути.

Для этих пяти дополнительных участков, среднее время необходимое свету для преодоления расстояния равного диаметру земной орбиты, составило: **22,34 минуты** +0,55 -0,53 мин. (+2,5 -2,4%). Это соответствует скорости света: **223 000 км/с**, что несколько меньше чем на предыдущих участках, см. приложение п. 2.4.

**3.2.4. Определение скорости света по результатам наблюдений, за: 8 и 94; 8 и 95; 9 и 93; 9 и 94; 10 и 93, обращениями спутника Юпитера, см. рис. 7.**

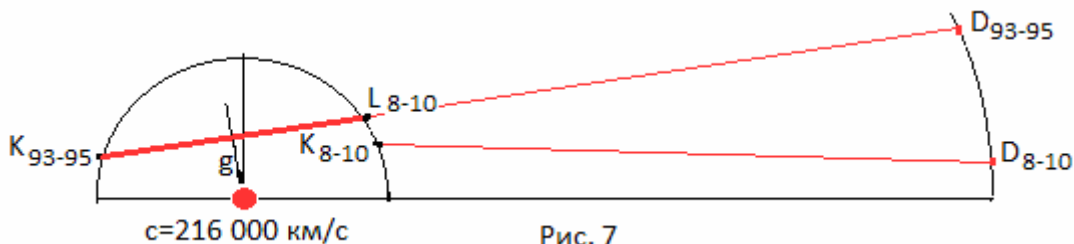


Рис. 7

На рисунке, отрезок  $L_{8-10}K_{93-95}$  представляет собой пучок, состоящий из пяти однотипных дополнительных (измерительных) участков:  $L_8K_{94}$ ,  $L_8K_{95}$ ,  $L_9K_{93}$ ,  $L_9K_{94}$ ,  $L_{10}K_{93}$ . Начальные и конечные точки наблюдения подобраны таким образом, чтобы каждый дополнительный участок был примерно равен хорде, по которой луч света пересекает орбиту Земли.

$g$  - средний вектор ускорения на Солнце на дополнительном участке пути; на каждом из пяти дополнительных участков пути вектор  $g$  направлен перпендикулярно дополнительному участку пути.

Для этих пяти измерительных участков, среднее время необходимое свету для преодоления расстояния равного диаметру земной орбиты, составило: **23,04 минуты** +0,64 -0,69 мин. (+2,8 -3%). Что соответствует скорости света: **216 000 км/с**, что также несколько меньше чем на предыдущем пучке участков, см. приложение п. 2.5.

### 3.2.5. Сравнительный анализ скорости распространения света в различных условиях

По результатам расчётов скорости света на первых двух пучках дополнительных участков:  $L_{10-15}K_{50-54}$  и  $L_{50-54}K_{90-95}$ , см. рис. 3 и 4, - можно сделать вывод, что скорость света зависит от угла между направлением вектора  $g$  на дополнительном участке пути и скоростью света. Другими словами, расчёты показывают, что гравитационное поле Солнце, на значительном удалении от его поверхности, обладает анизотропными свойствами по отношению к направлению распространения света, а именно: скорость света уменьшается при удалении света от Солнца и увеличивается при приближении к нему. По-видимому, аналогичными свойствами обладают гравитационные поля и других небесных тел и, в частности, Земли.

В свою очередь, различные эксперименты по определению скорости света, проводимые на поверхности Земли, позволяют сделать вывод, что вблизи поверхности Земли (и любой другой большой гравитирующей массы), гравитационное поле обладает изотропными свойствами по отношению к направлению скорости света. Из сравнения результатов земных экспериментов и расчётов по методу Рёмера следует, что изотропное гравитационное поле способствует распространению света с большей скоростью, чем анизотропное гравитационное поле.

По результатам расчётов скорости света на пучках дополнительных участков:  $L_{31-35}K_{64-68}$ ,  $L_{18-22}K_{79-83}$  и  $L_{8-10}K_{93-95}$ , см. рис. 5, 6, 7 - выявлена зависимость скорости света от абсолютного среднего значения параметра  $g$ , при распространении света перпендикулярно среднему вектору  $g$ . Расчёты показали, что при увеличении среднего значения параметра  $g$  скорость света уменьшается. Но эта зависимость просчитана для сравнительно небольшого диапазона изменения параметра  $g$ , от 0,007 до 0,015  $m/c^2$ . И её необходимо проверить при больших значениях параметра  $g$  и, в том числе, на дополнительном участке пути, проходящем в непосредственной близости от поверхности Солнца, см. рис. 8

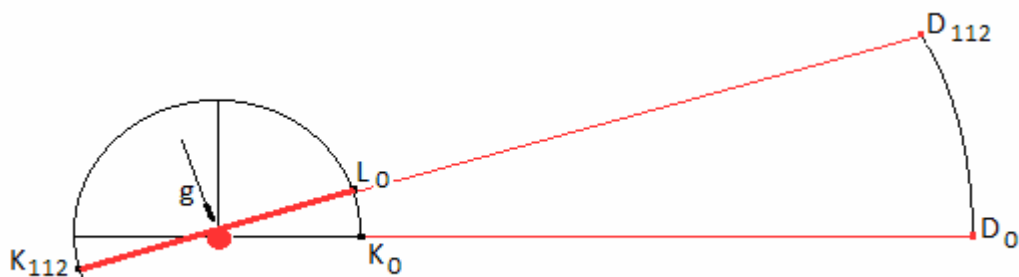


Рис. 8

На рисунке 8, дополнительный участок пути  $L_0K_{112}$  примерно равен диаметру земной орбиты. Средний вектор  $g$  направлен под прямым углом к направлению распространения света.

Но на участке  $L_0K_{112}$  скорость света не измерялась, по причине отсутствия в таблицах [3] наблюдений вблизи точки соединения.

Расчёт среднего времени для пучка однотипных измерительных участков позволил получить довольно надёжные значения скорости света, с отклонениями от среднего значения: +7,1 -6,1%; +4,8

-5,4%; +2,6 -2%; +2,2-2,4%; +2,8 -3%, - для измерительных участков изображённых на рисунках 3, 4, 5, 6 и 7, соответственно.

Разброс результатов единичных измерений от среднего значения объясняется значительной погрешностью таблиц [3], где отсчёт времени затмений спутника производился с погрешностью  $\mu$  0,5 минуты.

Рёмер фиксировал время затмения спутника с точностью до секунд, поэтому погрешность расчётов Рёмера меньше погрешности расчётов, проведенных по таблицам [3]

Рёмер округлил полученный результат до минут (22), следовательно, он оценил максимальную погрешность своих вычислений  $\mu$  0,5 минуты ( $\pm 2,3\%$ ) и нет причин считать, что он не верно оценил погрешность своих вычислений.

Из проведенных выше расчётов следует вывод, что нет никаких оснований приписывать Рёмеру ошибку в 32% для того, чтобы подогнать результаты его вычислений к общепринятому значению скорости света.

Нет оснований это делать ещё и потому, что Рёмер измерил скорость распространения света на участке пути в слабом анизотропном гравитационном поле, где ускорение создаваемое Солнцем составляет тысячные доли метра в секунду за секунду ( $0,005 \text{ м/с}^2$ ), см. Приложение п. 4.1. *Расчёт среднего значения параметра g в опытах Рёмера*

Все другие измерения скорости света и, в частности, измерения: Физо, Фуко, Майкельсона, - проводились в изотропном гравитационном поле на поверхности Земли, где ускорение свободного падения равно:  $9,81 \text{ м/с}^2$ .

### Выводы

1. Вычисления скорости света по методу Рёмера, с использованием исходных данных Рёмера, а также с использованием таблиц затмений спутника Юпитера Ио 1994-95 годов показывают, что Рёмер не допустил ошибок в своих вычислениях, хотя и получил результат  $227\,000 \text{ км/с}$ , существенно отличающийся от современного значения скорости света в вакууме (примерно,  $300\,000 \text{ км/с}$ ).

2. Сравнительный анализ измерения скорости света, методом Рёмера, на различных измерительных участках, позволяет сделать вывод, что гравитационное поле Солнце, на значительном удалении от поверхности, обладает анизотропными свойствами по отношению к направлению распространения света. То есть, скорость света зависит от угла между вектором g и направлением скорости света.

Скорость света также зависит от среднего абсолютного значения параметра g гравитационного поля на пути распространения света.

3. Методику Рёмера можно применить для дальнейшего изучения анизотропных свойств гравитационного поля Солнца и для нахождения подробной зависимости скорости света от абсолютных средних значений параметра g гравитационного поля на пути прохождения света, в диапазоне изменения параметра g от  $0,005 \text{ м/с}^2$  до  $2,0 \text{ м/с}^2$ , см. приложение п. 4.

4. По результатам проведенного исследования можно утверждать, что скорость света, равную:  $299\,792,458 \text{ км/с}$ , - уже нельзя считать фундаментальной физической константой. Это всего лишь локальная физическая константа, сохраняющая своё значение только вблизи поверхности Земли, при параметре g гравитационного поля, равном:  $9,81 \text{ м/с}^2$ .

5. Также, очевидно, что при определении расстояния до небесных тел и космических аппаратов методом локации необходимо учитывать зависимость скорости распространения света и электромагнитных волн от параметров окружающего гравитационного поля.

6. Значение открытия Рёмера до сих пор по достоинству не оценено и, по-видимому, настало время устранить эту несправедливость.

### Литература

1. *«Démonstration touchant le mouvement de la lumière trouvé par M. Römer de l'Académie Royale des Sciences»*, *Journal des Sçavans*: 233–36, 1676

2. *«A demonstration concerning the motion of light, communicated from Paris, in the Journal des Scavans, and here made English»*, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London T. 12*: 893–94, 1677

3. Таблицы затмений спутника Юпитера Ио, ROEMER AND THE VELOCITY OF LIGHT Francis BERTHOMIEU "EAAE Summer schools" Working Group GLEA, France /Википедия/измерение скорости света Рёмером.

4. THE HISTORY OF C By Erling Paulsen/Википедия/измерение скорости света Рёмером.

5. С.Р. Филонович «Самая большая скорость» Библиотечка «КВАНТ» выпуск 27, Москва «Наука» 1983 г.

6. «Классики физической науки» Г.М. Голин, С.П. Филонович, Москва «ВШ» 1989

7. Льюис Марио «История физики» Москва «Мир» 1970 г.

### Приложения:

1. Расчёт скорости света по наблюдениям Рёмера

2. Расчёт скорости света по таблицам затмений спутника Юпитера Ио 1994-1995 годов

2.1. Расчёт скорости света на участке убегания Земли между 13 и 53 обращениями спутника Юпитера и на других близких участках, расположенных в 1 четверти.

2.2. Расчет скорости света по результатам наблюдений, за: 53 и 95; 50 и 90; 50 и 91; 50 и 92; 50 и 93; 50 и 94; 50 и 95; 54 и 94; 54 и 95; 53 и 94; 52 и 94; 51 и 93, обращениями спутника Юпитера

2.3. Расчет скорости света по результатам наблюдений, за: 31 и 68; 32 и 67; 33 и 66; 34 и 65; 35 и 64, - обращениями спутника Юпитера.

2.4. Расчет скорости света по результатам наблюдений, за: 18 и 83; 19 и 82; 20 и 81; 21 и 80; 22 и 79, обращениями спутника Юпитера.

2.5. Расчет скорости света по результатам наблюдений за: 8 и 94; 8 и 95; 9 и 93; 9 и 94; 10 и 93, обращениями спутника Юпитера.

2.6. Сравнительный анализ скорости распространения света в различных условиях.

3. Расчёт скорости света по схеме с неподвижным Юпитером

4. Расчёт среднего значения параметра  $g$  на дополнительных участках пути

4.1. Расчёт среднего значения параметра  $g$  в опытах Рёмера

4.2. Расчёт среднего значения параметра  $g$ , при пересечении светом земной орбиты

4.2.1. Расчёт среднего значения параметра  $g$  на дополнительном участке пути, после 95 обращения спутника Юпитера

4.2.2. Определение среднего значения параметра  $g$  при прохождении света в непосредственной близости от поверхности Солнца, после 112 обращения спутника Юпитера

4.2.3. Определение среднего значения параметра  $g$ , после 111 обращения спутника Юпитера

## 1. Расчёт скорости света по наблюдениям Рёмера

Вопреки мнению оппонентов, Рёмер опубликовал достаточно полные исходные данные для выполнения расчёта по определению скорости света, а именно:

В своём первом сообщении [Л 1] Он приводит значение задержки выхода спутника Юпитера из тени (10 мин.); указывает, что задержка времени измерялась на участке движения Земли, соответствующем 40 обращениям спутника и упоминает, что отсчёт времени начался в августе. Он также указывает, что наблюдения завершились вечером 9 ноября в 5 часов 35 минут 45 секунд. Поскольку это время выхода спутника из тени после 40-го обращения, следовательно, начальная засечка времени была сделана 30 августа.

Из другой статьи Рёмера, также опубликованной в Журнале « Scavans» [Л 4], следует, что наблюдения за первым спутником Юпитера проводились также 7, 14 и 23 августа. Эти наблюдения Рёмер использовал для определения истинного периода обращения, о чём он упоминает в своём первом сообщении.

Наблюдение 7 августа проводилось сразу после противостояния, предваряющего великое противостояние. Расстояние от Земли до спутника Юпитера во время этого противостояния составляло приблизительно 4,0455 А.е.

Отсюда можно рассчитать, что 30-го августа наблюдалось 13-е обращение спутника Юпитера, считая от линии противостояния.

Этих данных вполне достаточно, чтобы вычертить в масштабе расчётную схему, см. рис. 2, учесть в ней перемещение Юпитера и подтвердить полученный Рёмером результат.

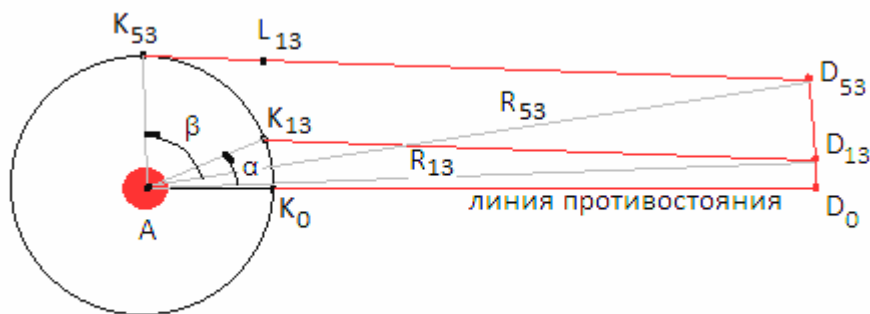


Рис. 2

На рисунке 2 приняты следующие обозначения:

$A$  – солнце;

$K_0, K_{13}, K_{53}$  - точки наблюдения на земной орбите за выходом из тени спутника Юпитера Ио: в противостоянии, после 13-го обращения и после 53-го обращения, соответственно;

$D_0, D_{13}, D_{53}$  – точки, обозначающие 1-й спутник Юпитера выходящий из тени: в противостоянии (после нулевого обращения), после 13-го обращения, после 53-го обращения, соответственно;

$R_{13}, R_{53}$  – расстояния до спутника Юпитера после 13 и 53 обращения, соответственно. При данном масштабе изображения орбита Юпитера сливается с эфемеридами спутника, появляющегося из тени (красная дуга  $D_0 D_{13} D_{53}$ ).

$D_{13}K_{13}$  - путь, пройденный светом, отражённым от спутника Юпитера, выходящим из тени, после 13-го обращения, считая от линии противостояния;

$D_{53}K_{53}$  - путь, пройденный светом, отражённым от спутника Юпитера, выходящим из тени после 53-го обращения.

Дополнительный путь, пройденный светом, из-за перемещения Земли из точки  $K_{13}$  в точку  $K_{53}$ , равен разности отрезков:  $D_{53}K_{53}$  и  $D_{13}K_{13}$ , то есть, равен отрезку:  $L_{13}K_{53}$ . Этот отрезок может быть построен графически.

Но задача определения дополнительного пути может быть решена и более точным аналитическим путём.

Отрезок:  $D_{13}K_{13}$ , определится из треугольника  $K_{13}AD_{13}$  по теореме косинусов.

В рассматриваемом треугольнике сторона  $AK_{13}$  равна радиусу земной орбиты: 1 А.е. Сторона  $AD_{13}$  равна расстоянию до спутника Юпитера после 13-го обращения  $R_{13}$ .

Вследствие эллиптичности орбиты Юпитера, расстояние от Солнца до Юпитера постоянно меняется, в пределах: 4,95 – 5,46 А.е.

В рассматриваемый период Земля и Юпитер приближались к очередному великому противостоянию, и до него оставался один синодический год.

Расстояние от Солнца до Юпитера во время противостояния, предвещающего очередное великое противостояние, приблизительно равно:  $4,95 + 0,0927 = 5,0427$  А.е. Где: 4,95 А.е. – расстояние от Солнца до Юпитера во время великого противостояния; 0,0927 А.е. – среднее расстояние на которое Юпитер приближается к Солнцу за синодический период обращения Земли (398,88 суток).

Расстояние от Солнца до спутника Юпитера Ио во время противостояния, предвещающего великое противостояние, равно:  $5,0427 + 0,0028 = 5,0455$  А.е. Где: 0,0028 А.е. – радиус орбиты спутника Юпитера

За время, соответствующее 13 обращениям спутника Юпитера расстояние от Солнца до спутника Юпитера несколько уменьшится, поправка составит:

$$\frac{13 \cdot 42,5}{398,88 \cdot 24} \cdot 0,0927 = 0,0053 \text{ А.е.}$$

И расстояние от Солнца до спутника Юпитера после 13 обращения составит:

$$AD_{13} = R_{13} = 5,0455 - 0,0053 = 5,0402 \text{ А.е.}$$

Угол  $\alpha$  определится как разница угловых перемещений Земли и Юпитера за время 13-и обращений спутника. Исходя из того, что одно обращение спутника происходит примерно за 42,5 часа, а за год (365,256 суток) происходит 206,4 обращения, находим, что угловое перемещение Земли за 13 обращений спутника, составит:  $22,7^\circ \left( \frac{13 \cdot 360}{206,4} = 22,7 \right)$ . А угловое перемещение

Юпитера, составит:  $1,9^\circ \left( \frac{22,7}{11,86} = 1,9 \right)$ . Где, 11,86 – отношение периодов обращений Юпитера и

Земли вокруг Солнца. Отсюда,  $\alpha = 22,7 - 1,9 = 20,8^\circ$

$$(D_{13}K_{13})^2 = 1 + 5,0402^2 - 2 \cdot 1 \cdot 5,0402 \cos 20,8^\circ = 16,9983$$

$$D_{13}K_{13} = 4,1229 \text{ А.е.}$$

Отрезок:  $D_{53}K_{53}$ , определится из треугольника  $K_{53}AD_{53}$  по теореме косинусов.

В рассматриваемом треугольнике сторона  $AK_{53}$  равна радиусу земной орбиты, а сторона  $AD_{53}$  равна расстоянию до спутника Юпитера, в противостоянии (5,0455 А.е.) с учётом поправки на эллиптичность орбиты Юпитера. За время соответствующее 53 обращениям спутника поправка составит:  $\frac{53 \cdot 42,5}{398,88 \cdot 24} \cdot 0,0927 = 0,0218 \text{ А.е.}$

$$AD_{53} = R_{53} = 5,0455 - 0,0218 = 5,0237 \text{ А.е.}$$

Угол  $\beta$  определится как разница угловых перемещений Земли и Юпитера за время 53 обращений спутника. Угловое перемещение Земли, равно:  $92,4^\circ \left( \frac{53 \cdot 360}{206,4} = 92,4 \right)$

Угловое перемещение Юпитера, равно:  $7,8^\circ \left( \frac{92,4}{11,86} = 7,8 \right)$ . Отсюда,  $\beta = 92,4 -$

$7,8 = 84,6^\circ$

$$(D_{53}K_{53})^2 = 1^2 + 5,0237^2 - 2 \cdot 1 \cdot 5,0237 \cos 84,6^\circ = 25,29202$$

$$D_{53}K_{53} = 5,0291 \text{ А.е.}$$

Дополнительный путь, пройденный светом за счёт убегания Земли, составит:  $5,0291 - 4,1229 = 0,9062 \text{ А.е.}$

Согласно наблюдениям и вычислениям Рёмера, на прохождение этого дополнительного пути свету понадобилось 10 минут. Следовательно, для того чтобы преодолеть путь равный диаметру земной орбиты (2 А.е.) свету понадобится 22,07 минуты  $\left( \frac{10 \cdot 2}{0,9062} = 22,07 \right)$ , то есть, приблизительно,

22 минуты. Что соответствует скорости света: **227 000 км/с**.

Проведенный расчёт подтверждает результат опубликованный Рёмером. Но, для того чтобы исключить все сомнения в правильности вычислений Рёмера, повторим вычисления, на основе табличных значений затмений спутника Юпитера 1994-1995 годов [3]

## 2. Расчёт скорости света по таблицам затмений спутника Юпитера Ио 1994-1995 годов

### 2.1. Расчёт скорости света на участке убегания Земли между 13 и 53 обращениями спутника Юпитера и на других близких участках, расположенных в 1 четверти, см. рис. 2

Противостояние Земли и Юпитера произошло 1 июня 1995 года в 11 часов 00 минут. Ближайшее великое противостояние произошло 23 октября 1999 года и до него оставалось 4 синодических года. Расстояние от Солнца до спутника Юпитера в момент противостояния 1995 года составляло, примерно:  $4,95 + 4 \cdot 0,0927 + 0,0028 = 5,3236 \text{ А.е.}$

Выход спутника Юпитера из тени после нулевого обращения зафиксирован 02.06.95 в 8 часов 06 минут.

Выход спутника из тени после 13-го обращения состоялся 25.06.95 в 8 часов 17 минут.

Выход спутника из тени после 53 обращения произошёл 04.09.95 в 03 часа 27 минут.

На симметричном участке земной орбиты, при приближении Земли к точке противостояния, после 42 обращения (т.е. за 53 обращения до точки противостояния) затмение спутника произошло 26.02.95 в 16 часов 27 минут. После 82 обращения (за 13 обращений до точки противостояния) затмение спутника произошло 08.05.95 в 11 часов 17 минут.

Время сорока обращений спутника от 13-го до 53-го обращения при удалении Земли от точки противостояния составило 1680 суток 19 часов 10 минут, или 101950 минут.

Время сорока обращений спутника от 42-го до 82-го обращения при приближении Земли к точке противостояния составило 1680 суток 18 часов 50 минут, или 101930 минут.

Среднее (истинное) время сорока обращений на симметричных участках орбиты Земли относительно линии противостояния составило 101940 минут.

Дополнительное время, которое потребовалось свету на преодоление дополнительного расстояния за счёт убегания Земли за время сорока обращений спутника от 13-го до 53-го обращения, составило 10 минут.

Расчёт дополнительного расстояния, пройденного светом, отражённым от спутника выходящего из тени после 53 обращения, в сравнении с расстоянием, пройденным светом, отражённым от спутника после 13-го обращения найдётся также как и в предыдущем случае, см. рис. 2.

С момента противостояния (1.06.95 в 11 час. 00 мин.) до выхода спутника из тени после 13 обращения (25.06.95 в 8 час. 17 мин.) прошло 23, 887 суток. Следовательно, поправка к расстоянию

до спутника Юпитера, составит:  $\frac{23,887}{398,88} \cdot 0,0927 = 0,0055$  А.е.

$$R_{13} = 5,3236 - 0,0055 = 5,3181 \text{ А.е.}$$

Угловое перемещение Земли после 13-го обращения спутника составит:  $\frac{23,887}{365,256} \cdot 360 = 23,54^\circ$

Угловое перемещение Юпитера после 13-го обращения спутника, составит:  $23,54/11,86 = 1,98^\circ$ . Где, 11,86 – отношение периодов обращений Юпитера и Земли вокруг Солнца.

Отсюда угол  $\alpha = 23,54 - 1,98 = 21,56^\circ$

Из треугольника  $K_{13}AD_{13}$  по теореме косинусов, находим:

$$(D_{13}K_{13})^2 = 1^2 + 5,3181^2 - 2 \cdot 1 \cdot 5,3181 \cos 21,56^\circ = 19,3902$$

$$D_{13}K_{13} = 4,4034 \text{ А.е.}$$

С момента противостояния (1.06.95 в 11 час. 00 мин.) до выхода спутника из тени после 53 обращения (4.09.95 в 3 час. 27 мин.) прошло 94,686 суток.

Поправка к расстоянию до спутника Юпитера, равна:  $\frac{94,686}{398,88} \cdot 0,0927 = 0,0220$  А.е.

$$R_{53} = 5,3236 - 0,0220 = 5,3016 \text{ А.е.}$$

Угловое перемещение Земли после 53-го обращения спутника, составит:  $\frac{94,686}{365,256} \cdot 360 = 93,32^\circ$

Угловое перемещение Юпитера после 53-го обращения спутника, составит:  $93,32/11,86 = 7,87^\circ$

И угол  $\beta = 93,32 - 7,87 = 85,45^\circ$

Из треугольника  $K_{53}AD_{53}$  по теореме косинусов, получим:

$$(D_{53}K_{53})^2 = 1^2 + 5,3016^2 - 2 \cdot 1 \cdot 5,3016 \cos 85,45^\circ = 28,2658$$

$$D_{53}K_{53} = 5,3166 \text{ А.е.}$$

Дополнительный путь  $L_{13}K_{53}$ , пройденный светом за счёт убегания Земли, составит:  $5,3166 - 4,4034 = 0,9132$  А.е.

Дополнительное время, затраченное светом на прохождение этого дополнительного пути равно 10 минутам.

Следовательно, на прохождение расстояния, равного диаметру земной орбиты (2 А.е.) свет затратит:  $\frac{10 \cdot 2}{0,9132} = 21,90$  минуты

Эти расчёты также подтверждают результат, полученный Рёмером.

Но, для того чтобы получить более надёжный результат, проведём ещё несколько расчётов с таблицами затмений спутника Юпитера 1994-95 года по методу Рёмера

Очевидно, что совсем не обязательно рассчитывать скорость света на участке убегания Земли, за время между 13-м до 53-м обращениями спутника, см. рис. 3

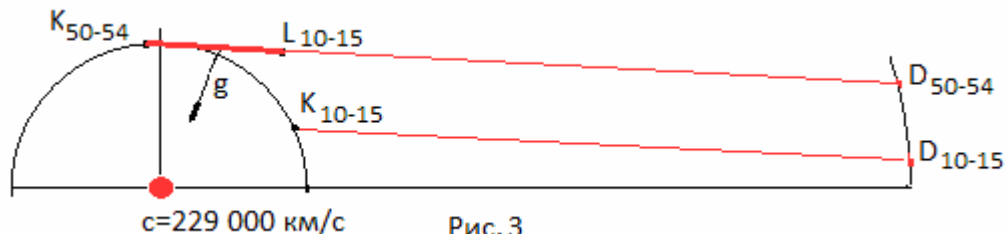


Рис. 3

На рисунке приняты следующие обозначения:

$D_{10-15}$ ;  $D_{50-54}$ , - спутник Юпитера Ио, выходящий из тени после 10-15 и 50-54 обращений, соответственно;

$K_{10-15}$ ;  $K_{50-54}$ , - точки наблюдения на земной орбите за спутником Юпитера, выходящим из тени;

$L_{10-15}K_{50-54}$  - дополнительный участок пути (пучок дополнительных участков), состоящий из двенадцати примерно одинаковых участков;

$g$  - средний вектор ускорения на Солнце на дополнительном участке пути.

Вектор  $g$  направлен под острым углом к направлению распространения света на дополнительном участке пути. Проекция вектора  $g$  на дополнительный участок пути направлена в сторону распространения света, что способствует увеличению скорости света.

Методом, рассмотренным выше, найдём задержку света, а также дополнительный путь и скорость света за счёт убегания Земли, за период времени:

**Между 10 и 50 обращениями спутника Юпитера.**

Дополнительный путь, равен: 0,8635 А.е.

Дополнительное время, равно: 9 минут

Время, необходимое свету для преодоления расстояния, равного диаметру орбиты Земли: 20,84 минут.

**Между 11 и 51 обращениями спутника Юпитера.**

Дополнительный путь, равен: 0,879 А.е.

Дополнительное время, равно: 9 минут

Время, необходимое свету для преодоления расстояния, равного диаметру орбиты Земли: 20,48 минут.

**Между 12 и 52 обращениями спутника Юпитера.**

Дополнительный путь, равен: 0,898 А.е.

Дополнительное время, равно: 10 минут

Время, необходимое свету для преодоления расстояния, равного диаметру орбиты Земли: 22,27 минут.

**Между 14 и 53 обращениями спутника Юпитера.**

Дополнительный путь, равен: 0,8989 А.е.

Дополнительное время, равно: 10,5 минут

Время, необходимое свету для преодоления расстояния, равного диаметру орбиты Земли: 23,36 минут.

**Между 15 и 53 обращениями спутника Юпитера.**

Дополнительный путь, равен: 0,8886 А.е.

Дополнительное время, равно: 10 минут

Время, необходимое свету для преодоления расстояния, равного диаметру орбиты Земли: 22,51 минут.

**Между 11 и 53 обращениями спутника Юпитера.**

Дополнительный путь, равен: 0,9298 А.е.

Дополнительное время, равно: 10 минут

Время, необходимое свету для преодоления расстояния, равного диаметру орбиты Земли: 21,51 минут.

**Между 11 и 52 обращениями спутника Юпитера.**

Дополнительный путь, равен: 0,9057 А.е.

Дополнительное время, равно: 9,5 минут

Время, необходимое свету для преодоления расстояния, равного диаметру орбиты Земли: 20,98 минут.

**Между 10 и 52 обращениями спутника Юпитера.**

Дополнительный путь, равен: 0,9179 А.е.

Дополнительное время, равно: 10 минут

Время, необходимое свету для преодоления расстояния, равного диаметру орбиты Земли: 21,79 минут.

**Между 10 и 51 обращениями спутника Юпитера.**

Дополнительный путь, равен: 0,8910 А.е.

Дополнительное время, равно: 9,5 минут

Время, необходимое свету для преодоления расстояния, равного диаметру орбиты Земли: 21,32 минут.

**Между 14 и 54 обращениями спутника Юпитера.**

Дополнительный путь, равен: 0,9245 А.е.

Дополнительное время, равно: 10,5 минут

Время, необходимое свету для преодоления расстояния, равного диаметру орбиты Земли: 22,71 минут.

**Между 15 и 54 обращениями спутника Юпитера.**

Дополнительный путь, равен: 0,9145 А.е.

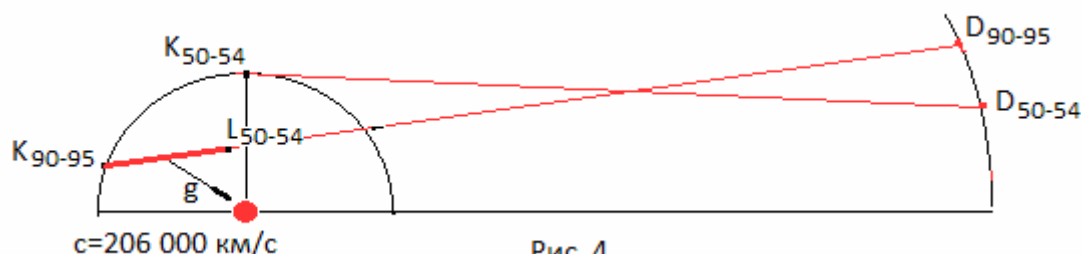
Дополнительное время, равно: 10 минут

Время, необходимое свету для преодоления расстояния, равного диаметру орбиты Земли: 21,87 минут.

Для этих двенадцати измерительных участков (13-53; 10-50; 11-51; 12-52; 14-53; 15-53; 11-53; 11-52; 10-52; 10-51; 14-54; 15-54), расположенных в первой четверти земной орбиты, среднее время необходимое свету для преодоления расстояния, равного диаметру орбиты Земли составляет: **21,80 минут** +1,56 -1,32 минут (+7,1 -6,1%). Что эквивалентно скорости света: **229 000 км/с**

Этот результат хорошо соответствует результату Рёмера, также полученному при измерении скорости света в первой четверти земной орбиты.

**2.2. Расчет скорости света по результатам наблюдений, за: 53 и 95; 50 и 90; 50 и 91; 50 и 92; 50 и 93; 50 и 94; 50 и 95; 54 и 94; 54 и 95; 53 и 94; 52 и 94; 51 и 93, обращениями спутника Юпитера, см. рис. 4.**



На рисунке приняты следующие обозначения:

$D_{50-54}$ ;  $D_{90-95}$  - спутник Юпитера Ио, выходящий из тени после 50-54 и 90-95 обращений, соответственно;

$K_{50-54}$ ;  $K_{90-95}$  - точки наблюдения на земной орбите за спутником Юпитера, выходящим из тени;

$L_{50-54}K_{90-95}$  - дополнительный участок пути (пучок дополнительных участков), состоящий из двенадцати примерно одинаковых участков;

$g$  - средний вектор ускорения на Солнце на дополнительном участке пути.

Вектор  $g$  направлен под тупым углом к направлению распространения света. Проекция вектора  $g$  на дополнительный участок пути направлена в сторону противоположную распространению света, что приводит к замедлению скорости света.

**Между 53 и 95 обращениями спутника Юпитера.**

Дополнительный путь, равен: 0,8726 А.е.

Дополнительное время, равно: 10 минут

Время необходимое свету для преодоления расстояния равного диаметру земной орбиты: 22,92 минуты

**Между 50 и 90 обращениями спутника Юпитера**

Дополнительный путь, равен: 0,8947 А.е.

Дополнительное время, равно: 10,5 минут

Время необходимое свету для преодоления расстояния равного диаметру земной орбиты: 23,47 минуты

**Между 50 и 91 обращениями спутника Юпитера**

Дополнительный путь, равен: 0,9076А.е.

Дополнительное время, равно: 11 минут

Время необходимое свету для преодоления расстояния равного диаметру земной орбиты: 24,24 минуты

**Между 50 и 92 обращениями спутника Юпитера**

Дополнительный путь, равен: 0,9207 А.е.

Дополнительное время, равно: 11,5 минут

Время необходимое свету для преодоления расстояния равного диаметру земной орбиты: 24,98 минут.

**Между 50 и 93 обращениями спутника Юпитера**

Дополнительный путь, равен: 0,9326 А.е.

Дополнительное время, равно: 11,5 минут

Время необходимое свету для преодоления расстояния равного диаметру земной орбиты: 24,66 минут

**Между 50 и 94 обращениями спутника Юпитера**

Дополнительный путь, равен: 0,9445 А.е.

Дополнительное время, равно: 12 минут

Время необходимое свету для преодоления расстояния равного диаметру земной орбиты: 25,41 минут

**Между 50 и 95 обращениями спутника Юпитера**

Дополнительный путь, равен: 0,9536 А.е.

Дополнительное время, равно: 11,5 минут

Время необходимое свету для преодоления расстояния равного диаметру земной орбиты: 24,12 минут

**Между 54 и 94 обращениями спутника Юпитера**

Дополнительный путь, равен: 0,8351 А.е.

Дополнительное время, равно: 10,5 минут

Время необходимое свету для преодоления расстояния равного диаметру орбиты Земли: 25,15 минут

**Между 54 и 95 обращениями спутника Юпитера**

Дополнительный путь, равен: 0,8465 А.е.

Дополнительное время, равно: 10 минут

Время необходимое свету для преодоления расстояния равного диаметру орбиты Земли: 23,63 минут

**Между 53 и 94 обращениями спутника Юпитера**

Дополнительный путь, равен: 0,8615 А.е.

Дополнительное время, равно: 10,5 минут

Время необходимое свету для преодоления расстояния равного диаметру орбиты Земли: 24,38 минут

**Между 52 и 94 обращениями спутника Юпитера**

Дополнительный путь, равен: 0,8887 А.е.

Дополнительное время, равно: 10,5 минут

Время необходимое свету для преодоления расстояния равного диаметру орбиты Земли: 23,63 минут

**Между 51 и 93 обращениями спутника Юпитера**

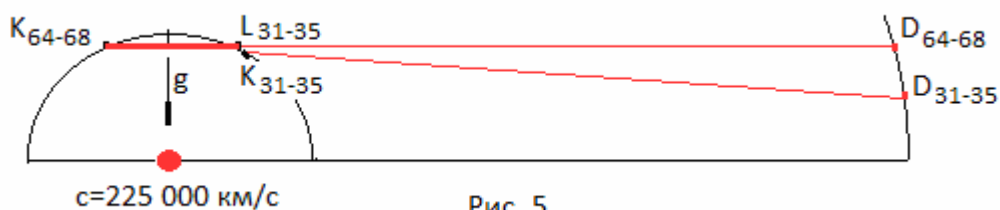
Дополнительный путь, равен: 0,9043 А.е.

Дополнительное время, равно: 11 минут

Время необходимое свету для преодоления расстояния равного диаметру орбиты Земли: 24,33 минут

Для этих двенадцати измерительных участков (53-95; 50-90; 50-91; 50-92; 50-93; 50-94; 50-95; 54-94; 54-95; 53-94; 52-94; 51-93) расположенных во 2-й четверти, среднее время необходимое свету для преодоления расстояния равного диаметру земной орбиты, составило: **24,24 минуты** +1,17 -1,32 мин. (+4,8 -5,4%). Что соответствует скорости света: **206 000 км/с**

**2.3. Расчет скорости света по результатам наблюдений за: 31 и 68; 32 и 67; 33 и 66; 34 и 65; 35 и 64, - обращениями спутника Юпитера, см. рис. 5**



На рисунке приняты следующие обозначения:

$D_{31-35}$ ;  $D_{64-68}$  - спутник Юпитера Ио, выходящий из тени после 31-35 и 64-68 обращений, соответственно;

$K_{31-35}$ ;  $K_{64-68}$  - точки наблюдения на земной орбите за спутником Юпитера, выходящим из тени;

$L_{31-35}K_{64-68}$  - дополнительный участок пути (пучок дополнительных участков), состоящий из пяти примерно одинаковых участков;

$g$  - средний вектор ускорения на Солнце на дополнительном участке пути, направлен перпендикулярно дополнительному участку пути.

Начальные и конечные точки наблюдения подобраны таким образом, чтобы каждый дополнительный участок пути был примерно равен хорде, по которой луч пересекает орбиту Земли. Отклонения не превышают 1%. Это обстоятельство и обуславливает перпендикулярное направление вектора  $g$  по отношению к направлению распространения света.

**Между 31 и 68 обращениями спутника Юпитера**

Дополнительный путь, равен: 0,97105 А.е.

Дополнительное время, равно: 11 минут

Время, необходимое свету для преодоления расстояния, равного диаметру орбиты Земли: 22,68 минут.

**Между 32 и 67 обращениями спутника Юпитера**

Дополнительный путь, равен: 0,9235 А.е.

Дополнительное время, равно: 10,5 минут

Время, необходимое свету для преодоления расстояния, равного диаметру орбиты Земли: 22,74 минут.

**Между 33 и 66 обращениями спутника Юпитера**

Дополнительный путь, равен: 0,8746 А.е.

Дополнительное время, равно: 9,5 минут

Время, необходимое свету для преодоления расстояния, равного диаметру орбиты Земли: 21,72 минуты.

**Между 34 и 65 обращениями спутника Юпитера**

Дополнительный путь, равен: 0,8264 А.е.

Дополнительное время, равно: 9 минут

Время, необходимое свету для преодоления расстояния, равного диаметру орбиты Земли: 21,78 минуты.

**Между 35 и 64 обращениями спутника Юпитера**

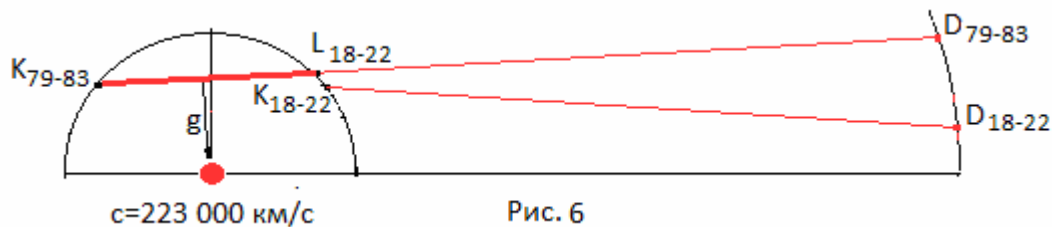
Дополнительный путь, равен: 0,7749 А.е.

Дополнительное время, равно: 8,5 минут

Время, необходимое свету для преодоления расстояния, равного диаметру орбиты Земли: 21,94 минуты

Для этих пяти измерительных участков (32-68; 32-67; 33-66; 34-65; 35-64) расположенных в 1 и 2 четвертях, среднее время необходимое свету для преодоления расстояния равного диаметру земной орбиты, составило: **22,17 минуты** +0,57 -0,45 мин (+2,6 -2%). Что соответствует скорости света: **225 000 км/с**, то есть имеет промежуточное значение между скоростями света, на рассмотренных выше участках.

**2.4. Расчет скорости света по результатам наблюдений за: 18 и 83; 19 и 82; 20 и 81; 21 и 80; 22 и 79, обращениями спутника Юпитера, см. рис. 6.**



На рисунке приняты следующие обозначения:

$D_{18-22}$ ;  $D_{79-83}$  - спутник Юпитера Ио, выходящий из тени после 18-22 и 79-83 обращений, соответственно;

$K_{18-22}$ ;  $K_{79-83}$  - точки наблюдения на земной орбите за спутником Юпитера, выходящим из тени;

$L_{18-22}K_{79-83}$  - дополнительный участок пути (пучок дополнительных участков), состоящий из пяти примерно одинаковых участков;

$g$  - средний вектор ускорения на Солнце на дополнительном участке пути, направлен перпендикулярно дополнительному участку пути.

**Между 18 и 83 обращениями спутника Юпитера**

Дополнительный путь, равен: 1,5496 А.е.

Дополнительное время, равно: 17,5 минут

Время, необходимое свету для преодоления расстояния, равного диаметру орбиты Земли: 22,59 минуты.

**Между 19 и 82 обращениями спутника Юпитера**

Дополнительный путь, равен: 1,5132 А.е.

Дополнительное время, равно: 16,5 минут

Время, необходимое свету для преодоления расстояния, равного диаметру орбиты Земли: 21,81 минуты.

**Между 20 и 81 обращениями спутника Юпитера**

Дополнительный путь, равен: 1,47775 А.е.

Дополнительное время, равно: 16,5 минут

Время, необходимое свету для преодоления расстояния, равного диаметру орбиты Земли: 22,33 минуты.

**Между 21 и 80 обращениями спутника Юпитера**

Дополнительный путь, равен: 1,4418 А.е.

Дополнительное время, равно: 16,5 минут

Время, необходимое свету для преодоления расстояния, равного диаметру орбиты Земли: 22,89 минуты.

**Между 22 и 79 обращениями спутника Юпитера**

Дополнительный путь, равен: 1,4042 А.е.

Дополнительное время, равно: 15,5 минут

Время, необходимое свету для преодоления расстояния, равного диаметру орбиты Земли: 22,08 минуты

Для этих пяти измерительных участков: 18-83; 19-82; 20-81; 21-80; 22-79, расположенных в 1 и 2 четвертях, среднее время необходимое свету для преодоления расстояния равного диаметру земной орбиты, составило: **22,34 минуты** +0,55 -0,53 мин. (+2,5 -2,4%). Это соответствует скорости света: **223 000 км/с**, что несколько меньше чем на предыдущем участке.

**2.5. Расчет скорости света по результатам наблюдений за: 8 и 94; 8 и 95; 9 и 93; 9 и 94; 10 и 93, обращениями спутника Юпитера, см. рис. 7.**

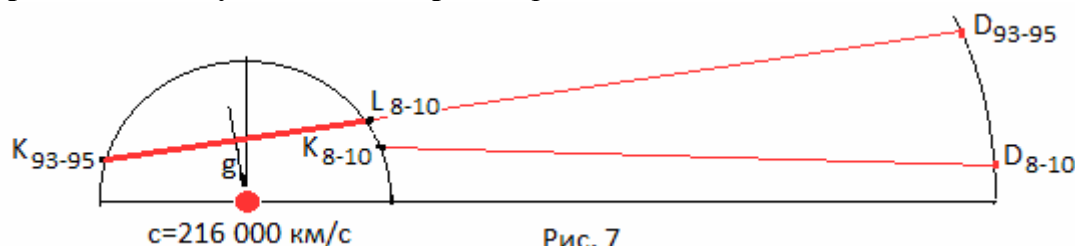


Рис. 7

На рисунке приняты следующие обозначения:

$D_{8-10}$ ;  $D_{93-95}$  - спутник Юпитера Ио, выходящий из тени после 8-10 и 93-95 обращений, соответственно;

$K_{8-10}$ ;  $K_{93-95}$  - точки наблюдения на земной орбите за спутником Юпитера, выходящим из тени;

$L_{8-10}$   $K_{93-95}$  - дополнительный участок пути (пучок дополнительных участков), состоящий из пяти примерно одинаковых участков;

$g$  - средний вектор ускорения на Солнце на дополнительном участке пути, направлен перпендикулярно дополнительному участку пути.

**Между 8 и 94 обращениями спутника Юпитера**

Дополнительный путь, равен: 1,8237 А.е.

Дополнительное время, равно: 21 минута

Время, необходимое свету для преодоления расстояния, равного диаметру орбиты Земли: 23,03 минуты.

**Между 8 и 95 обращениями спутника Юпитера**

Дополнительный путь, равен: 1,8345 А.е.

Дополнительное время, равно: 20,5 минут

Время, необходимое свету для преодоления расстояния, равного диаметру орбиты Земли: 22,35 минуты.

**Между 9 и 93 обращениями спутника Юпитера**

Дополнительный путь, равен: 1,80415 А.е.

Дополнительное время, равно: 21 минута

Время, необходимое свету для преодоления расстояния, равного диаметру орбиты Земли: 23,28 минуты.

**Между 9 и 94 обращениями спутника Юпитера**

Дополнительный путь, равен: 1,81565 А.е.

Дополнительное время, равно: 21,5 минут

Время, необходимое свету для преодоления расстояния, равного диаметру орбиты Земли: 23,68 минуты.

## Между 10 и 93 обращениями спутника Юпитера

Дополнительный путь, равен: 1,79495 А.е.

Дополнительное время, равно: 20,5 минут

Время, необходимое свету для преодоления расстояния, равного диаметру орбиты Земли: 22,84 минуты

Для этих пяти измерительных участков: 8-94; 8-95; 9-93; 9-94; 10-93, расположенных в 1 и 2 четвертях, среднее время необходимое свету для преодоления расстояния равного диаметру земной орбиты, составило: **23,04 минуты** +0,64 -0,69 мин. (+2,8 -3%). Что соответствует скорости света: **216 000 км/с**, что несколько меньше чем на предыдущих участках.

Результаты вычислений скорости света на этом пучке измерительных участков более точны. Поскольку дополнительные участки ( $L_{8-10}K_{93-95}$ ) более продолжительны, а условия распространения света на основных участках:  $D_{93-95}L_{8-10}$  и  $D_{8-10}K_{8-10}$ , практически идентичны.

## 2.6. Сравнительный анализ скорости распространения света в различных условиях

По результатам расчётов скорости света на первых двух пучках дополнительных участков:  $L_{10-15}K_{50-54}$  и  $L_{50-54}K_{90-95}$ , см. рис. 3 и 4, - можно сделать вывод, что скорость света зависит от направления вектора  $g$  на дополнительном участке пути. Другими словами, расчёты показывают, что гравитационное поле Солнце, на значительном удалении от его поверхности, обладает анизотропными свойствами по отношению к направлению распространения света. Скорость света уменьшается при удалении света от Солнца и увеличивается при приближении к нему. Очевидно, что аналогичными свойствами обладают гравитационные поля других небесных тел и, в частности, Земли.

В свою очередь, различные эксперименты по определению скорости света, проводимые на поверхности Земли, позволяют сделать вывод, что вблизи поверхности Земли (и любой другой большой гравитирующей массы), гравитационное поле обладает изотропными свойствами по отношению к направлению распространения света. И, очевидно, изотропное гравитационное поле способствует распространению света с большей скоростью, чем анизотропное гравитационное поле, при тех же абсолютных значениях  $g$ .

По результатам расчётов скорости света на пучках дополнительных участков пути:  $L_{31-35}K_{64-68}$ ,  $L_{18-22}K_{79-83}$  и  $L_{8-10}K_{93-95}$ , см. рис. 5, 6, 7 - выявлена зависимость скорости света от абсолютного значения параметра  $g$ , при распространении света перпендикулярно среднему вектору  $g$ . Расчёты показали, что при увеличении среднего значения параметра  $g$  скорость света уменьшается.

Однако эта зависимость просчитана для сравнительно небольшого диапазона изменения параметра  $g$ , от 0,007 до 0,015  $m/c^2$  и на значительном удалении (несколько десятков радиусов) от поверхности Солнца. Эту зависимость необходимо проверить при больших значениях параметра  $g$  и, в частности, на дополнительном участке пути, проходящем в непосредственной близости от поверхности Солнца, см. рис. 8

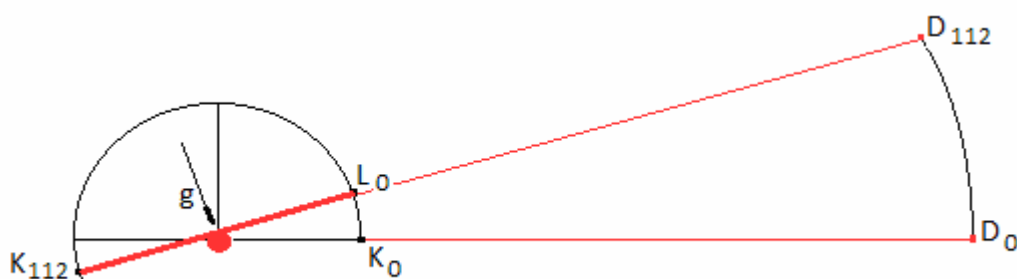


Рис. 8

На рисунке 8, дополнительный участок пути  $L_0K_{112}$  примерно равен диаметру земной орбиты. Средний вектор  $g$  направлен под прямым углом к направлению распространения света.

Но на участке  $L_0K_{112}$  скорость света не измерялась, по причине отсутствия в таблицах [3] наблюдений вблизи точки соединения.

Расчёт среднего времени для пучков однотипных измерительных участков позволил получить довольно надёжные значения скорости света, с отклонениями от среднего значения: +7,1 - 6,1%; +4,8 - 5,4%; +2,6 - 2%; +2,2-2,4%; +2,8 - 3%, - для измерительных участков изображённых на рисунках 3, 4, 5, 6 и 7, соответственно.

Разброс результатов единичных измерений от среднего значения объясняется значительной погрешностью таблиц [3], где отсчёт времени затмений спутника производился с погрешностью  $\mu$  0,5 минуты. Следовательно, в самом неблагоприятном случае, когда отсчёт времени начальной засечки округлён до минут в большую сторону, а отсчёт времени конечной засечки округлён до минут в меньшую сторону, или наоборот, погрешность при определении дополнительного времени составит  $\pm 1$  минуту от измеряемой величины. Что, например, для дополнительных участков, показанных на рисунках 3 и 4, соответствует максимальной относительной погрешности  $\pm 10\%$ . Применение метода усреднения значений для пучка однотипных дополнительных участков, позволило несколько уменьшить влияние погрешности таблиц на конечный результат. Но для дальнейшего повышения точности расчётов скорости света методом Рёмера, необходимо иметь более точные таблицы затмений спутника Юпитера.

Рёмер фиксировал время затмения спутника с точностью до секунд, поэтому погрешность расчётов Рёмера меньше погрешности расчётов, проведенных по таблицам [3]

Рёмер округлил полученный результат до минут (22), следовательно, он оценил максимальную погрешность своих вычислений  $\mu$  0,5 минуты ( $\pm 2,3\%$ ) и нет причин считать, что он не верно оценил погрешность своих вычислений.

В общем и целом результаты измерения скорости света методом Рёмера, с использованием таблиц [3] дают значения скоростей света даже меньше скорости света, полученной Рёмером ( $c=227\ 000$  км/с).

Значения скорости света, полученные с использованием таблиц [Л3] ещё дальше отстоят от величины общепринятой константы скорости света в вакууме ( $c \approx 300\ 000$  км/с). Очевидно, что эти существенные различия в скоростях (227 000 и 300 000) не могут быть объяснены ни ошибками Рёмера, ни погрешностями при выполнении приведенных выше расчётов, по таблицам [3]. Эти различия в скоростях света могут быть объяснены только различными параметрами среды (гравитационного поля) на дополнительных (измерительных) участках пути, проходимых светом.

### 3. Расчёт скорости света по схеме с неподвижным Юпитером

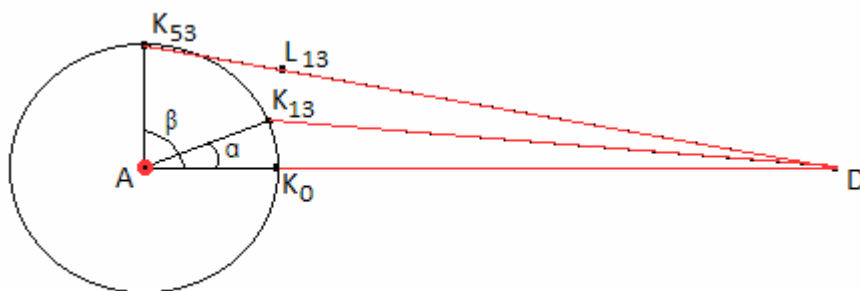


Рис. 9

На рисунке приняты следующие обозначения:

A – солнце;

D – спутник Юпитера, появляющийся из тени;

$K_0, K_{13}, K_{53}$  - точки на земной орбите, где наблюдается появление спутника после 0, 13, 53 обращения;

$L_{13}K_{53}$  - дополнительный путь, пройденный светом вследствие убегания Земли на участке орбиты  $K_{13}K_{53}$ ;

$\alpha$  - угловое перемещение Земли за время соответствующее 13-и обращениям спутника Юпитера;

$\beta$  - угловое перемещение Земли за время соответствующее 53-м обращениям спутника Юпитера.

Углы  $\alpha$  и  $\beta$ , применительно к таблицам затмений 95, года найдены ранее, они равны:  $23,54^\circ$  и  $93,32^\circ$ , соответственно.

Отрезок  $DK_0=4,3236$  А.е.; отрезок  $AD=5,3236$  А.е.

Из треугольника  $AK_{13}D$ , по теореме косинусов найдём длину стороны  $DK_{13}$ ;  $DK_{13}=4,4249$  А.е.

Из треугольника  $AK_{53}D$ , по теореме косинусов вычислим длину стороны  $DK_{53}$ ;  $DK_{53}=5,4732$  А.е.

Отсюда, дополнительный путь, пройденный светом, равен:

$$L_{13}K_{53} = 5,4732 - 4,4249 = 1,0483 \text{ А.е.}$$

А время необходимое свету для преодоления расстояния, равного диаметру земной орбиты, равно:  $\frac{2 \cdot 10}{1,0483} = 19,1$  минуты.

Полученный результат ближе к современному значению, чем результат Рёмера, но всё ещё далёк от него. Кроме того, уменьшение времени с 22 до 19,1 минут получено благодаря намеренно допущенной грубой методической ошибке, связанной с не учётом перемещения Юпитера.

#### 4. Расчёт среднего значения параметра $g$ на дополнительных участках пути

Обратим внимание на то, что не было предметом исследования Рёмера, а именно: на условиях распространения света в его опытах.

Отраженный от спутника солнечный свет последовательно проходит: сильное гравитационное поле спутника, по мере удаления от него ослабевающее; затем, проходя вблизи Юпитера, свет проходит его сильное гравитационное поле, ослабевающее по мере удаления от планеты; далее свет попадает в зону влияния Солнца и, пройдя большую часть пути в слабом гравитационном поле Солнца, попадает, наконец, в зону влияния Земли, где гравитационное поле начинает усиливаться уже за счёт гравитационного поля Земли.

Если сравнить два пути пройденные светом:  $D_{13}K_{13}$  и  $D_{53}K_{53}$ , см. рис. 2, то очевидно, что в обоих случаях свет проходит все вышеназванные участки пути. Но отрезок  $D_{53}K_{53}$  больше отрезка  $D_{13}K_{13}$  на величину отрезка пути  $L_{13}K_{53}$ . Параметр  $g$  гравитационного поля на этом участке определяется в основном Солнцем.

Исходя из того, что: радиус земной орбиты составляет  $1,496 \cdot 10^8$  км, сидерический период обращения Земли составляет 365,256 суток, орбитальная скорость Земли равна  $29,783$  км/с, - величина ускорения, создаваемого гравитационным полем Солнца на орбите Земли составляет, примерно:  $0,0059$  м/с<sup>2</sup>.

Ускорение создаваемое Юпитером в районе земной орбиты составляет всего лишь  $0,00000032$  м/с<sup>2</sup>, что на четыре порядка меньше ускорения, создаваемого Солнцем и, следовательно, этой величиной можно пренебречь.

Максимальное значение параметра  $g$  у поверхности Земли составляет  $9,81$  м/с<sup>2</sup>. На расстоянии 41 земного радиуса (это меньше половины радиуса Солнца), параметр  $g$  гравитационного поля Земли становится меньше ускорения создаваемого Солнцем ( $0,0059$  м/с<sup>2</sup>). Если учесть, что радиус земной орбиты (1 А.е.) равен 214,94 радиусам Солнца, то зона влияния гравитационного поля Земли, в сравнении с зоной влияния гравитационного поля Солнца весьма мала. Если также принять во внимание, что заключительный этап пути свет всегда проходит в одних и тех условиях (в гравитационном поле Земли), то время прохождения светом дополнительного участка пути зависит только от длины этого участка и от параметров гравитационного поля Солнца на этом дополнительном участке пути.

Зная параметр  $g$  гравитационного поля Солнца на орбите Земли в точке  $K$  и удаление точки  $L_{13}$  от земной орбиты, можно определить параметр  $g$  в точке  $L_{13}$  и определить среднее значение параметра  $g$  на дополнительном участке пути  $L_{13}K_{53}$ .

#### 4.1. Расчёт среднего значения параметра $g$ в опытах Рёмера

На орбите Земли (в точке К)  $g = 0,0059 \text{ м/с}^2$ , см. рис. 2.

В точке  $L_{13}$  величина  $g$  определится по формуле обратных квадратов, если известно расстояние от точки  $L'$  до Солнца.

Вектор  $AL_{13}$  примерно равен 1,3 А.е. Следовательно, параметр  $g$  в точке  $L_{13}$  равен:  
 $0,0035 \text{ м/с}^2 \left( \frac{0,0059}{1,3^2} = 0,0035 \right)$

Поскольку обратно квадратичная зависимость параметра  $g$  на участке  $L_{13}K_{53}$  слабо выражена, среднее значение параметра  $g$  на этом участке можно определить как полусумму значений параметра  $g$  в точках  $L_{13}$  и  $K_{53}$ . Среднее значение параметра  $g$  на участке  $L_{13}K_{53}$  приблизительно равно  $0,005 \text{ м/с}^2$ .

То есть, Рёмер определил скорость света в слабом гравитационном поле, с параметром  $g = 0,005 \text{ м/с}^2$ . Причём в данной области пространства, как показывают расчёты: 2.2, 2.3, - гравитационное поле обладает анизотропными свойствами по отношению к направлению распространения света.

Если же отражённый от спутника луч света пересекает орбиту Земли, см. рис. 10, то среднее значение  $g$  находится по более сложной формуле.

#### 4.2. Расчёт среднего значения параметра $g$ , при пересечении светом земной орбиты

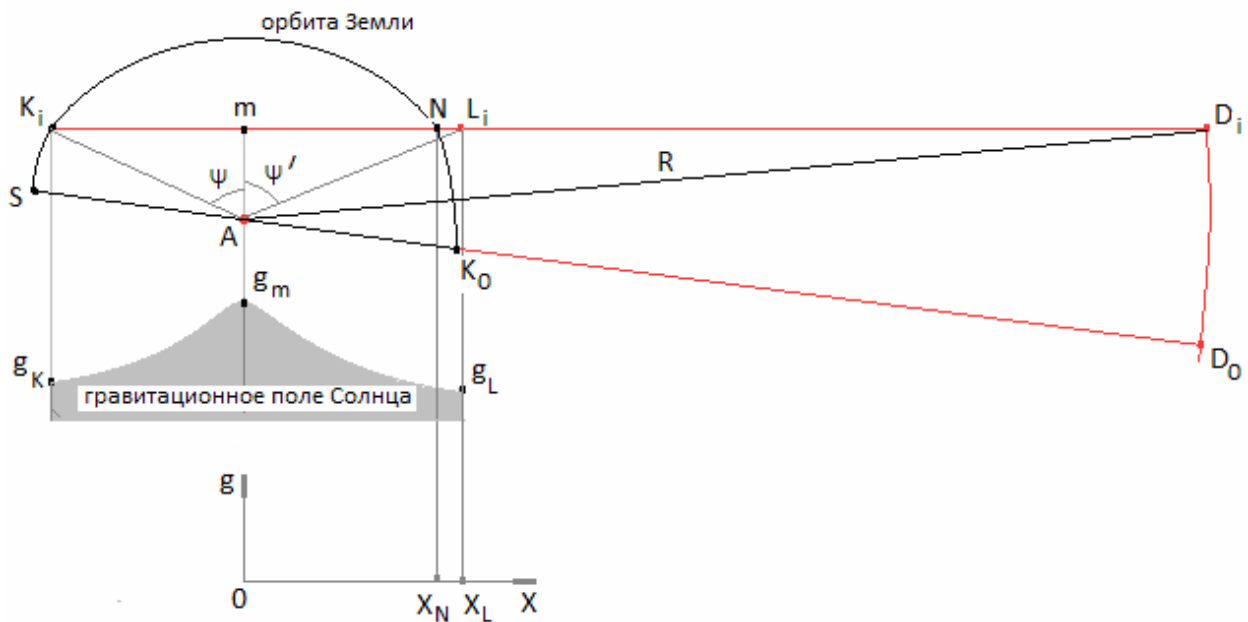


Рис. 10

На рисунке приняты следующие обозначения:

$D_0$  и  $D_i$  - спутник Юпитера появляющийся из тени после нулевого и  $i$ -го обращения;

$K_0$  и  $K_i$  - точки наблюдения на земной орбите за появлением спутника Юпитера после нулевого и  $i$ -го обращения;

$D_0K_0$  - путь, пройденный светом, отражённым от спутника после нулевого обращения (во время противостояния);

$D_iK_i$  - путь, пройденный светом, отражённым от спутника после  $i$ -го обращения;

$R$  - расстояние до спутника Юпитера;

$L_iK_i$  - дополнительный путь, пройденный светом вследствие убегания Земли на участке траектории от  $K_0$  до  $K_i$ ;

$K_iN$  - хорда, по которой луч света, отражённый от спутника после  $i$ -го обращения пересекает орбиту Земли;

$m$  - средняя точка хорды, соответствующая максимальному значению параметра  $g$  гравитационного поля Солнца;

$g_m$  - максимальное значение ускорения свободного падения, создаваемого гравитационным полем Солнца, на дополнительном участке пути;

$g_K$  - ускорение свободного падения, создаваемого Солнцем в районе земной орбиты;

$g_{L_i}$  - ускорение свободного падения на Солнце в точке  $L_i$  (в начале дополнительного пути);

$\psi$  - половинный угол, стягиваемый хордой;

$x$  - ось абсцисс, где длина дополнительного пути выражена в отрезках  $Am$ , то есть:

$$x_L = \frac{L_i m}{Am}; \quad x_N = \frac{mN}{Am} \quad \text{или} \quad x_N = \frac{mK_i}{Am}.$$

Среднее значение ускорения свободного падения  $g^*$  гравитационного поля Солнца на участке  $L_i m$  определится по формуле:

$$g^* = \frac{\int_0^{x_L} g_m dx}{x_L} \quad (1)$$

Интеграл является табличным, и окончательно выражение для определения среднего значения параметра, запишется в виде:

$$g^* = \frac{g_m}{x_L} \cdot \arctg x \Big|_0^{x_L} \quad (2)$$

Значение параметра  $g^*$  на участке  $m - K$  определится по аналогичным формулам:

$$g^* = \frac{\int_0^{x_N} g_m dx}{x_N} \quad (3)$$

$$g^* = \frac{g_m}{x_N} \cdot \arctg x \Big|_0^{x_N} \quad (4)$$

А среднее значение параметра  $g^*$  на всём дополнительном участке пути  $L_i K_i$  определится как среднее арифметическое параметра  $g^*$  на участках:  $L_i m$  и  $m K_i$ .

#### 4.2.1. Расчёт среднего значения параметра $g$ на дополнительном участке пути, соответствующему периоду времени между 0 и 95 обращениями спутника Юпитера

Рассчитаем значение параметра  $g^*$  на дополнительном участке пути после 95 обращения спутника Юпитера, пользуясь таблицами затмений спутника Юпитера 1995 года.

Противостояние Земли и Юпитера произошло 1 июня 1995 года в 11 часов 00 минут.

Выход спутника Юпитера из тени после нулевого обращения зафиксирован 02.06.95 в 8 часов 06 минут. Расстояние от Солнца до спутника Юпитера в этот момент составляло: 5,3236 А.е.

Выход спутника Юпитера из тени после 95 обращения зафиксирован 17.11.95 в 11 часов 37 минут, по прошествии 4056 часов 37 минут (169,026 суток) после противостояния.

Сидерический период обращения Земли равен 365,256 суток. Следовательно, угловое перемещение Земли от противостояния до завершения 95 обращения спутника составило:

$$\frac{169,026}{365,256} \cdot 360 = 166,6^\circ$$

Угловое перемещение Юпитера за это же время составило:  $166,6/11,86 = 14,0^\circ$

Угол  $K_i A D_i$  равен:  $166,6 - 14 = 152,6^\circ$ , где  $i = 95$

В треугольнике  $K_i A D_i$ , сторона  $A K_i$  равна 1 А.е., сторона  $A D_i$  приблизительно равна 5,3236 А.е. Длина стороны  $K_i D_i$  находится по теореме косинусов.

Отрезок  $L_0 K_{95} = 1,863$  А.е.

То есть, дополнительный путь, пройденный светом, вследствие убегания Земли, равен 1,863 А. е.

Дуга земной орбиты  $K_i S$ , равна:  $180 - 166,6 = 13,4^\circ$

Угловое перемещение Юпитера ( $14^\circ$ ) равно полуразности дуг  $K_0 N$  и  $K_i S$ . Отсюда, дуга  $K_0 N$ , равна:  $2 \cdot 14 + 13,4 = 41,4^\circ$

Следовательно, хорда  $NK_i$  стягивает дугу, равную:  $180 - 13,4 - 41,4 = 125,2^\circ$ . Угол  $\psi = 125,2/2 = 62,6^\circ$ ;  $\text{tg } \psi = 0,888/0,46 = 1,93$

Полухорда  $K_i m$ , равна:  $1 \cdot \sin \psi = 0,888$  А.е.

Хорда  $NK_i$ , равна: 1,776 А.е.

Отрезок  $Am$ , равен:  $1 \cdot \cos \psi = 0,46$  А.е.

Отрезок  $NL_i$ , равен:  $1,863 - 1,776 = 0,087$  А.е.

Отрезок  $mL_i$ , равен:  $0,888 + 0,087 = 0,975$  А.е.

$\text{tg } \psi' = 0,975/0,46 = 2,12$ ;  $\psi' = 64,7^\circ$

Если отрезок  $Am$  принять за единицу, то полухорда  $K_i m$  будет равна 1,93, то есть  $x_N = 1,93$ , а отрезок  $mL_i$  (или  $x_L$ ) будет равен 2,12

Ускорение свободного падения, создаваемое гравитационным полем Солнца в точке  $m$  определится по формуле обратных квадратов исходя из того, что ускорение на орбите Земли (на расстоянии 1 А.е. от Солнца) составляет  $0,0059 \text{ м/с}^2$ , а точка  $m$  удалена от Солнца на расстояние 0,46 А.е.

$$\text{Отсюда, } g_m = 0,0059 \left( \frac{1}{0,46} \right)^2 = 0,0279 \text{ м/с}^2$$

Подставляя полученные значения:  $g_m$  и  $x_L$  в формулу (2):  $g^* = \frac{g_m}{x_L} \cdot \text{arctg} x \Big|_0^{x_L}$  и учитывая, что  $\text{arctg} x_L = \psi'$  получим значение параметра  $g^*$  на участке  $L_i m$ . Угол  $\psi'$  необходимо выразить в радианах,  $\psi' = 1,13$  радиан

$$g^* = \frac{0,0279}{2,12} \cdot 1,13 = 0,015 \text{ м/с}^2$$

Подставляя полученные значения:  $g_m$ ,  $x_N$ ,  $\psi$ , в формулу (4)  $g^* = \frac{g_m}{x_N} \cdot \text{arctg} x \Big|_0^{x_N}$ , получим значение параметра  $g^*$  на участке  $mK$ .

$$g^* = \frac{0,0279}{1,93} \cdot 1,093 = 0,016 \text{ м/с}^2$$

И среднее значение параметра  $g^*$  на всём дополнительном участке пути  $L_0 K_{95}$  найдётся как среднее арифметическое:

$$g^* = (0,015 + 0,016) / 2 = 0,0155 \text{ м/с}^2.$$

#### 4.2.2. Определение среднего значения параметра $g$ при прохождении света в непосредственной близости от поверхности Солнца, после 112 обращения спутника Юпитера

Наибольшая средняя величина параметра  $g$ , будет достигнута при прохождении луча света в непосредственной близости от поверхности Солнца (на отрезке  $L_0 K_{112}$ ), см. рис. 11. Определим среднее значение параметра  $g$  для этого случая.

Изменение параметра  $g$  гравитационного поля Солнца на дополнительном отрезке пути будет выглядеть следующим образом:

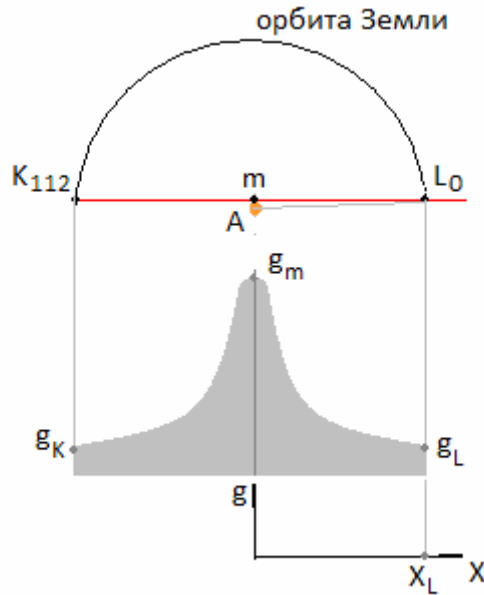


Рис. 11

На рисунке приняты следующие условные обозначения:

Отрезок  $Am$  равен радиусу Солнца, примем его равным единице. Отрезок  $mL_0$  приблизительно равен радиусу земной орбиты, или 214,94 радиусам Солнца.

Отрезок  $L_0K_{112}$  - дополнительный отрезок пути пройденный светом после 112 обращений спутника Юпитера, считая от линии противостояния.

$g_m$  - максимальное значение ускорения свободного падения ( $274 \text{ м/с}^2$ )

$g_K, g_L$  - ускорение, создаваемое Солнцем на орбите Земли ( $0,0059 \text{ м/с}^2$ )

Среднее значение функции  $g$  на отрезке  $m-L_{112}$  можно определить по формуле:

$$g^* = \frac{\int_0^{214,94} \frac{274dx}{1+x^2}}{214,94} \text{ м/с}^2$$

Где,  $g^*$  - среднее значение ускорения на отрезке  $mL_0$ ;

$x$  – расстояние, выраженное в радиусах Солнца и измеренное по направлению луча света;

$274 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения на поверхности Солнца;

214,94 – длина отрезка  $mL_0$ , выраженная в радиусах Солнца.

Интеграл, стоящий в числителе является табличным, и окончательно, получим:

$$g^* = \frac{274 \cdot \arctg x \Big|_0^{214,94}}{214,94} = \frac{274 \cdot 1,566}{214,94} = 2,0 \text{ м/с}^2$$

Очевидно, что и на всём отрезке:  $L_0K_{112}$ , среднее значение ускорения, создаваемого Солнцем, будет равно  $2,0 \text{ м/с}^2$ . Это наибольшая величина параметра  $g^*$ , которая может быть достигнута при измерении скорости света по методу Рёмера.

Эта величина существенно меньше, чем ускорение свободного падения на поверхности Земли. Кроме того, на большей части отрезка  $L_0K_{112}$  гравитационное поле Солнца анизотропно, по отношению к направлению распространения света. По этим причинам, следует ожидать, что скорость света, измеренная методом Рёмера, не будет равна скорости света, измеренной у поверхности Земли (299 792 , 458 км/с)

#### 4.2.3. Определение среднего значения параметра $g$ , после 111 обращения спутника Юпитера

Оценим значение параметра  $g^*$  на дополнительном пути света после 111 оборотов, см. рис. 11.

В этом случае луч света пройдёт на удалении, примерно, 6-и солнечных радиусов от поверхности Солнца, а отрезок  $Am$  будет приблизительно равен 7 радиусам Солнца. Ускорение свободного падения в точке  $m$  составит  $5,59 \text{ м/с}^2$  ( $\frac{274}{7^2} = 5,59$ )

Примем длину отрезка  $Am$  за единицу, тогда длина отрезка  $mL_0$  будет равна: 30,7 (214,9/7=30,7)

И среднее значение функции  $g$  на отрезке  $mL_0$  определится по формуле:  $g^* = \frac{\int_0^{30,7} \frac{5,59 dx}{1+x^2}}{30,7}$

$$\text{Отсюда, получим: } g^* = \frac{5,59 \cdot \arctg x \Big|_0^{30,7}}{30,7} = \frac{5,59 \cdot 1,538}{30,7} = 0,28 \text{ м/с}^2$$

Очевидно, что и на всём дополнительном пути  $L_0K_{111}$  среднее значение ускорения будет равно  $0,28 \text{ м/с}^2$ .