

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ФОТОНОВ ОТ ОПТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

**М.Н. Раимкулов**, канд. техн. наук, с.н.с., ведущий научный сотрудник  
Институт сейсмологии Национальной академии наук Кыргызской Республики  
(Кыргызстан, г. Бишкек)

DOI:10.24412/2500-1000-2023-10-2-197-203

**Аннотация.** В данной статье рассмотрен принцип, на основе которого происходит преломление потока фотонов, при переходе из одной среды в другую. Показано, что угол преломления напрямую связан с диаметром фотона (длиной волны). На основе этого принципа преломления предложен принцип распространения фотонов в среде. Показано, что скорость распространения в среде зависит от угла отклонения фотонов от первоначального направления движения, что приводит к увеличению пути прохождения фотонов в среде и, как следствие, к увеличению времени прохождения среды определенной толщины. И, основываясь на предложенных принципе преломления и распространения, выведена математическая зависимость скорости движения фотонов от оптической среды, в которой они распространяются.

**Ключевые слова:** фотоны, скорость, преломление, среда, распространение, скорость распространения фотонов, оптическая среда, принцип преломления фотонов.

Прежде чем найти зависимость скорости распространения фотонов от оптической среды важно разобраться в механизме распространения потока фотонов через ту или иную среду. В этом случае нам помогут исследования, которые были ранее проведены для зависимости угла преломления фотонов на границе раздела двух сред от среды и радиуса фотонов определенной длины волны [3, с. 19-27]. Ранее было показано [1, с. 79-86; 3, с. 19-27], что угол изменения направления фотонов при столкновении с частицами среды, равен:

$$\varphi = \frac{kC\tau}{d_{\phi}}, \quad k \geq 2 \quad (1)$$

Где:  $k$  – коэффициент, связанный с величиной упругости при отражении края фотона от частицы среды;

$C$  – это скорость света в вакууме;

$d_{\phi}$  – это диаметр фотона;

$\tau$  – это время прилипания фотона к частице среды.

Также было показано, что время прилипания фотонов  $\tau$  зависит от положительного заряда ядер частиц среды, от радиусов частиц среды и радиусов фотонов [3, с.

19-27; 4, с. 17-22]. Причем чем больше суммарный положительный заряд частицы, тем больше время прилипания  $\tau$  и соответственно больше угол отклонения от первоначальной траектории  $\varphi$ . И, наоборот, чем больше радиус частицы, с которой сталкивается фотон, тем меньше время прилипания  $\tau$  и, соответственно, меньше угол отклонения от первоначальной траектории  $\varphi$ . Чем меньше радиус фотона, тем меньше время прилипания  $\tau$ . Чем больше радиус фотона, тем больше время прилипания  $\tau$ . В целом зависимость от радиуса дает дисперсию фотонов для одной и той же среды, а зависимость от времени прилипания  $\tau$  дает нам различный угол преломления для разных сред.

### 1. Принцип преломления и распространения фотонов в среде.

Именно угол отклонения от первоначальной траектории  $\varphi$  (1) и дает, по мнению автора, различную скорость распространения фотонов в той или иной среде. Посмотрим, как это осуществляется на практике. Этот угол изменения направления формирует угол преломления фотонов, при их попадании на раздел двух сред (рис. 1).

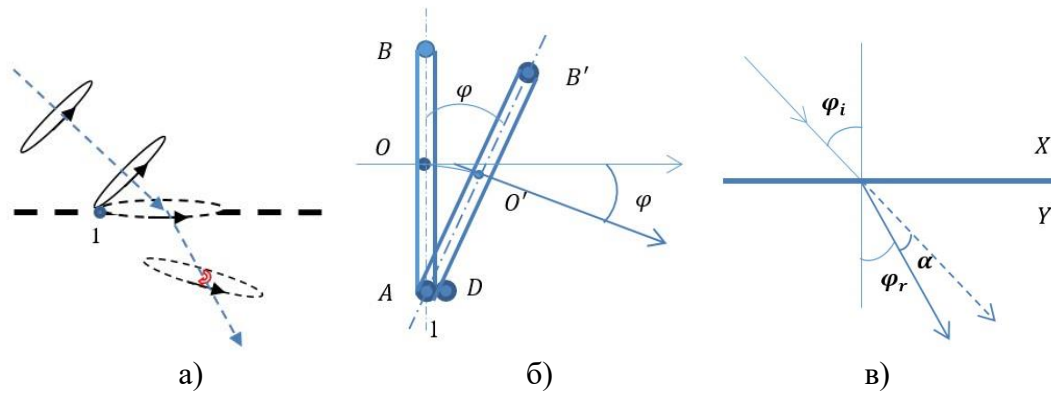


Рис. 1. Изменение направления потока фотонов при преломлении

В качестве пояснения рисунка 1, следует отметить, что на рисунке 1.а показано как фотон сталкивается с ближайшей частичкой среды в области 1, вследствие чего меняется его траектория движения [3, с. 19-27]. На рисунке 1.б более детально показан механизм столкновения фотона с частицей среды в области 1 и изменения направления движения на угол  $\varphi$ . На рисунке 1.в показана разница между углом преломления  $\varphi_r$  и углом отклонения от первоначальной траектории движения

фотона  $\alpha$ . Ниже будет показана связь и различие между углом отклонения  $\varphi$  и углом отклонения  $\alpha$ . Здесь важно понимать, что после столкновения своей, например, нижней точкой, следующее столкновение для подавляющего большинства фотонов будет верхней точкой. Это связано с вращением фотона, которое задается ему после очередного столкновения с частицей среды (Рис. 2):

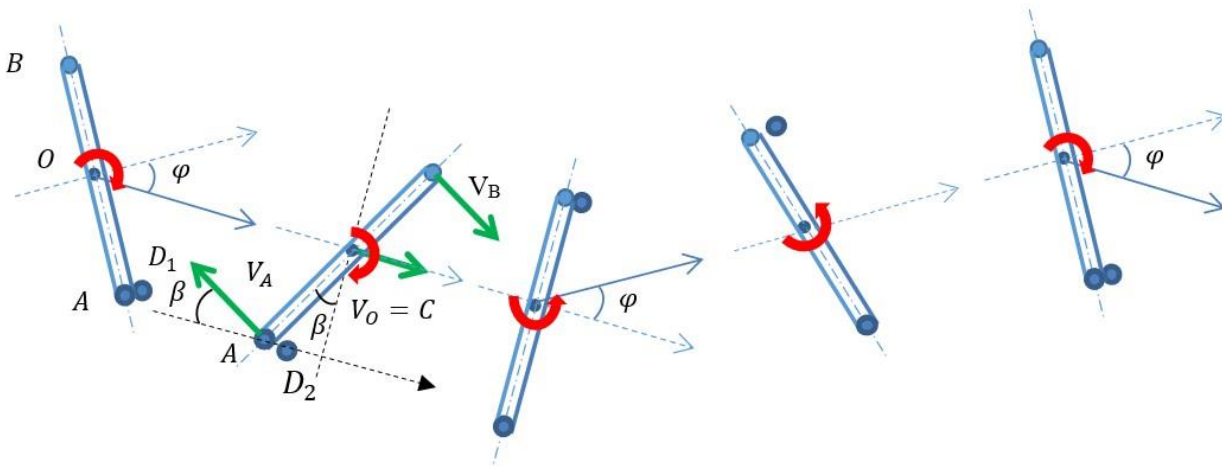


Рис. 2. Точка столкновения фотона в зависимости от его скорости и направления вращения

Разберем более детально, почему столкновение происходит поочередно то верхней, то нижней точкой фотона. Ранее было определено, что линейная скорость вращения края фотона равна  $kC$  [1, с. 19-27], где  $k$  больше или равна 2. Т.е. линейная скорость вращения  $V_A$  точки А вокруг

центра фотона, точки О, минимум в два раза больше скорости света  $C$ . Чтобы понять, как эта линейная скорость вращения края фотона влияет на столкновение с частицами среды нам надо определить проекцию этой скорости на направление движения фотона. Она будет равна:

$$V_A = C - kC \cos \beta \quad (2)$$

Где:  $\beta$  – это угол поворота фотона от вертикального положения, т.е. от

перпендикуляра к направлению движения фотона (рис. 2);

$C$  (первый член уравнения (2)) – это общая скорость движения фотона (скорость движения его центра  $O$ );

$kC\cos\beta$  (второй член уравнения (2)) – это проекция линейной скорости вращения точки  $A$  фотона, на общее направление движения фотона.

Как мы понимаем, для того, чтобы фотон не столкнулся своей точкой  $A$  с очередной встречной частицей среды, проекция линейной скорости вращения точки  $A$  на направление распространения фотона должна быть не больше нуля, т.е.  $V_A \leq 0$ . Для расчета скорости точки  $A$ , мы можем взять минимальное значение коэффициента  $k$ , равное 2. Это позволит нам определить минимальную величину пробега фотона в среде, которую он успеет сделать до следующего столкновения с частицей среды. Тогда из уравнения (2), получаем:

$$C - 2C\cos\beta \leq 0 \quad (3)$$

Откуда мы можем найти косинус угла  $\beta$ :

$$\cos\beta \geq \frac{1}{2} \quad (4)$$

В этом случае угол  $\beta$  будет равен:

$$\beta \leq 60^\circ \quad (5)$$

Т.е. при повороте фотона на угол от  $0^\circ$  до  $60^\circ$  точка  $A$  фотона не столкнется со встречной частицей  $D_2$  среды (Рис. 2). Если же поворот фотона составит более  $60^\circ$ , то тогда точка  $A$  фотона способна столкнуться со встречной частицей среды. Следует также отметить, что для точек фотона, расположенных между точкой  $A$  и центром фотона (точкой  $O$ ) этот угол будет меньше, чем  $60^\circ$ .

Как мы понимаем поворот фотона на угол  $60^\circ$  займет какое-то время  $t$ . По прошествии этого времени  $t$ , фотон способен столкнуться своим краем, точкой  $A$ , со встречной частицей среды. Найдем длину пробега фотона за этот промежуток

времени, чтобы понять вероятность столкновения точкой  $A$  фотона с частицами среды. Так как  $\beta = \omega t$ , то время будет равно:

$$t = \frac{\beta}{\omega} \quad (6)$$

В нашем случае  $\omega$  равна:

$$\omega = \frac{V_A}{R_\Phi} \quad (7)$$

Где:  $V_A$  – это линейная скорость вращения точки  $A$  фотона вокруг его центра;

$R_\Phi$  – это радиус фотона.

Тогда, исходя из формулы (7), найдем время поворота фотона на угол  $60^\circ$ . Оно будет равно:

$$t = \frac{\beta}{V_A} R_\Phi \quad (8)$$

Как отмечено выше, ранее было определено, что линейная скорость вращения точки  $A$  фотона равна минимум  $2C$  ( $V_A = 2C$ ), а радиус фотона для длины волны 405 нм, при линейной скорости вращения края фотона со скоростью  $2C$ , равен 128,9 нм ( $R_\alpha = 128,9$  нм) [2, с. 53-55]. Тогда для поворота фотона на  $60^\circ$  от вертикального положения, ему потребуется время равное  $2,25 \times 10^{-16}$  секунд. За это время фотон, при скорости полета в вакууме равной  $C$ , пройдет расстояние равное 67,5 нм.

Этот же расчет можно сделать иначе. Ранее было показано, что длина волны это расстояние, которое фотон проходит за промежуток времени равный его обороту на  $360^\circ$ . В данном случае поворот фотона на  $60^\circ$  составляет одну шестую от  $360^\circ$ . Тогда расстояние, пройденное фотоном за это время, будет равно одной шестой части от длины его волны, т.е.  $405 \div 6 = 67,5$  нм. Такой расчет гораздо проще, но первый вариант расчета более наглядный.

Для жидких и твердых светопроводящих сред это расстояние достаточно большое, чтобы фотон успел столкнуться с частицами среды своей точкой  $B$  и стал бы вращаться в противоположную сторону,

чтобы затем имел возможность столкнуться вновь точкой А и т.д.

Теперь попробуем разобраться как будет двигаться отдельный фотон, после вхождения в новую среду (рис. 3).

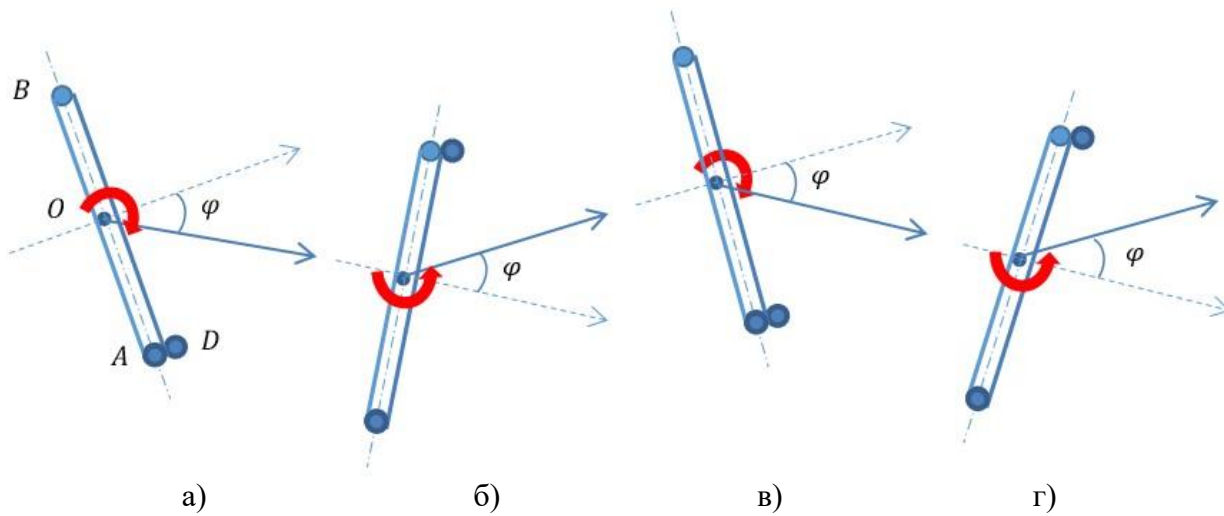


Рис. 3. Столкновение фотона с частицами среды

Столкнувшись с первой частицей среды (Рис. 3.а) фотон изменяет направление своего движения на угол  $\varphi$  и вместе с этим начинает вращаться в определенную сторону, показанную красной стрелкой. Так он летит в новом направлении до тех пор пока не встретится со следующей частицей среды и, после столкновения с ней, вновь изменит направление своего

движения и направление своего вращения (рис. 3.б). Потом вновь летит до столкновения и вновь меняет направление движения и направление вращения (рис. 3.в), потом опять сталкивается со следующей частицей (рис. 3.г) и т.д.

Таким образом, фотоны в среде движутся по пилообразной траектории (рис. 4).

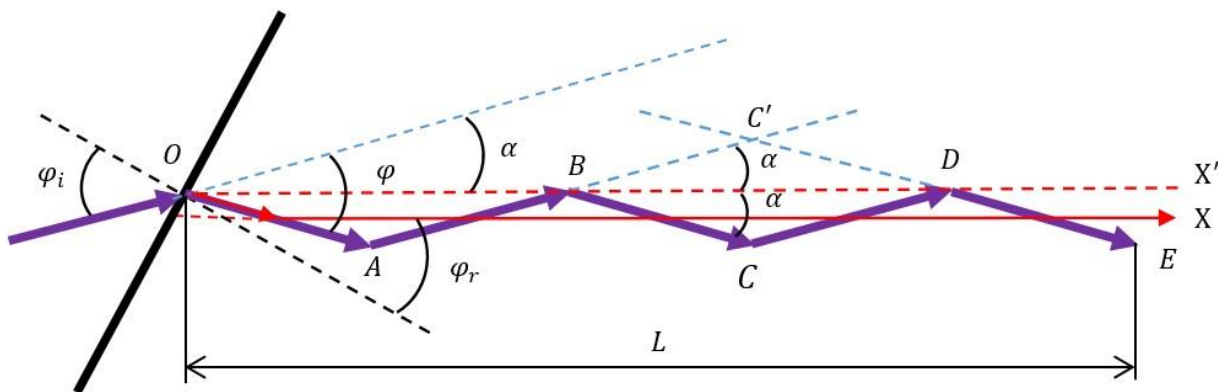


Рис. 4. Траектория движения фотона в среде

Как видно из рисунка 4, после преломления фотона в точке О (на первой частице среды) траектория его движения идет до точки А (второй частице среды), далее до точки В, потом до точки С и т.д. На рисунке 4 угол  $\varphi$  это угол изменения направления движения фотона после столкновения с частицей среды, но угол преломления,

который мы видим наглядно, например, после вхождения луча в стекло, это угол  $\varphi_r$ . Т.е. под углом  $\varphi_r$  к нормали мы видим усредненное направление движения фотона вдоль оси X. Из рисунка мы видим, что это направление распространения фотона вдоль оси X имеет смещение от первоначальной траектории падающего луча на

угол  $\alpha$ , а не на угол  $\varphi$ . Чтобы понять, как соотносятся эти углы, визуальнo продлим отрезки  $|AB|$  и  $|DE|$  до точки  $C'$ . Таким образом, получился ромб с вершинами в точках:  $B, C, D, C'$  (конечно, мы понимаем, что при реальном распространении, расстояния между столкновениями  $|OA|, |AB|, |BC|, |CD|, |DE|$  не будут абсолютно равными, но в усредненном виде они будут примерно равны). Таким образом ось  $X'$ , параллельная оси  $X$  (которая является усредненным направлением распространения потока фотонов вдоль данной среды) делит ромб по диагонали. А угол ромба  $BCS'$ , который, как мы видим, является углом  $\varphi$ , делится этой диагональю пополам. Т.е. угол  $\alpha$  составляет половину угла  $\varphi$ :

$$\alpha = \frac{1}{2}\varphi \quad (9)$$

Таким образом, угол  $\alpha$  это угол усредненного изменения направления распространения фотонов после преломления на границе раздела двух сред, а угол  $\varphi$  это угол изменения направления движения фотона после каждого столкновения с частицами среды. Именно этот угол нам будет нужен для определения скорости распространения фотонов в той или иной среде.

## 2. Скорость распространения фотонов в среде.

Автор исходит из предположения, что скорость распространения фотонов от столкновения до столкновения, это фактически скорость света (фотонов) в вакууме, т.е. она равна стандартной величине  $C$ . Тогда время, которое потратит каждый фотон на прохождение среды толщиной  $L$ , это время, которое он потратит на прохождение пути фотона складывающегося из отрезков его траектории  $S$  со скоростью  $C$ . В нашем случае величина пути  $S$  будет равна:

$$S = |OA| + |AB| + |BC| + |CD| + |DE| \quad (10)$$

Мы не знаем величины отрезков  $|OA|, |AB|, |BC|, |CD|, |DE|$ , но легко можно заме-

рить толщину слоя  $L$ , также нам известны углы преломления в разных средах. Из известных углов падения  $\varphi_i$  и преломления  $\varphi_r$ , мы легко можем найти угол отклонения  $\alpha$ . Поэтому для того, чтобы получить зависимость скорости распространения фотонов от среды, найдем величины проекций участков траектории движения фотона на усредненное направление распространения потока фотонов в данной среде, т.е. для нашего случая на ось  $X'$  (Рис. 4). Так проекция отрезка  $|OA|$  на ось  $X'$ , будет равна:

$$l_{OA} = |OA| \times \cos\alpha \quad (11)$$

Аналогично проекции других участков пути  $S$  на ось  $X'$ , будут равны:

$$\begin{aligned} l_{AB} &= |AB| \times \cos\alpha; \quad l_{BC} = |BC| \times \cos\alpha; \\ l_{CD} &= |CD| \times \cos\alpha; \quad l_{DE} = |DE| \times \cos\alpha \end{aligned} \quad (12)$$

Тогда толщина слоя оптической среды  $L$ , будет равна сумме проекций участков  $|OA|, |AB|, |BC|, |CD|$  и  $|DE|$ :

$$\begin{aligned} L &= l_{OA} + l_{AB} + l_{BC} + l_{CD} + l_{DE} = \\ &= |OA|\cos\alpha + |AB|\cos\alpha + |BC|\cos\alpha + \\ &+ |CD|\cos\alpha + |DE|\cos\alpha \end{aligned} \quad (13)$$

Немного преобразуем уравнение (13), вынеся общий для всех членов множитель  $\cos\alpha$  за скобки. Тогда получим:

$$L = (|OA| + |AB| + |BC| + |CD| + |DE|) \times \cos\alpha \quad (14)$$

Полученная сумма в скобках не что иное, как реальная длина пути  $S$ , при прохождении фотоном среды толщиной  $L$ . Подставляя  $S$  в уравнение (14), перепишем его в следующем виде:

$$L = S \times \cos\alpha \quad (15)$$

Помня о том, что  $\alpha = \frac{1}{2}\varphi$  (9), мы теперь можем найти зависимость реальной длины пути прохождения фотонами  $S$  от той или иной среды толщиной  $L$ :

$$S = \frac{L}{\cos \frac{1}{2}\varphi} \quad (16)$$

Из формулы (16) мы можем сделать вывод, что чем больше угол отклонения фотона  $\varphi$ , тем больший путь проходит каждый фотон в среде толщиной  $L$ . Как уже выше было отмечено, вполне логично предположить, что между столкновениями участки среды  $|OA|$ ,  $|AB|$ ,  $|BC|$ ,  $|CD|$  и  $|DE|$  фотоны проходят со скоростью света в вакууме  $C$ . Тогда время прохождения слоя среды толщиной  $L$ , будет равно:

$$t = \frac{S}{C} = \frac{L}{C \times \cos \frac{1}{2}\varphi} \quad (17)$$

Как мы помним, скорость прохождения среды определяется исходя из толщины среды  $L$  и времени  $t$ , которое затрачивают фотоны на прохождение этой толщины:

$$V_{\text{ср}} = \frac{L}{t} \quad (18)$$

Подставляя в это уравнение значение для времени  $t$  из формулы (17), получим:

$$V_{\text{ср}} = \frac{L \times C \times \cos \frac{1}{2}\varphi}{L} = C \times \cos \frac{1}{2}\varphi \quad (19)$$

Таким образом, формула (19) наглядно демонстрирует зависимость скорости распространения потока фотонов от угла отклонения фотонов  $\varphi$ , при их столкновении с частицами среды. Она показывает, что чем больше угол отклонения фотонов от первоначальной траектории  $\varphi$ , тем меньше скорость распространения фотонов в данной среде. А сам угол отклонения, как выше было отмечено, зависит от величины заряда ядер частиц среды, от радиусов частиц среды и радиусов фотонов, проходящих через данную среду.

Исходя из этой зависимости, для частного случая распространения фотонов в вакууме, где столкновения отсутствуют и соответственно угол отклонения фотонов  $\varphi$  равен нулю, скорость распространения фотонов становится равной величине  $C$ :

$$V_{\text{в}} = C \times \cos 0 = C \quad (20)$$

Также следует отметить, что в формуле (17) для времени распространения в среде мы не учитывали время задержек  $\tau$ , которые происходят на каждом столкновении фотонов с частицами среды. И несмотря на то, что суммарно эти задержки вероятнее всего на много меньше времени, которое тратится на прохождение каждого отрезка, но тем не менее оно присутствует. С учетом этого времени общее время прохождения среды толщиной  $L$ , будет равно:

$$t = \frac{S}{C} + \sum \tau_i = \frac{L}{C \times \cos \frac{1}{2}\varphi} + \sum \tau_i \quad (21)$$

Где  $\tau_i$  – это время прилипания фотона при каждом столкновении с частицей среды.

Как мы понимаем, исходя из этой коррекции времени прохождения среды, изменится и формула скорости прохождения среды, она будет равна:

$$V_{\text{ср}} = \frac{L}{t} = \frac{L}{\frac{L}{C \times \cos \frac{1}{2}\varphi} + \sum \tau_i} = \frac{L \times C \times \cos \frac{1}{2}\varphi}{L + \sum \tau_i \times C \times \cos \frac{1}{2}\varphi} \quad (22)$$

Эта формула не столь наглядна, как полученная ранее формула (19), но важно помнить, что величина угла  $\varphi$  тем больше, чем больше время прилипания  $\tau$ , при каждом столкновении. Т.е. чем больше время прилипания фотона при каждом столкновении, тем больше угол отклонения на этих столкновениях и, соответственно, мы получаем меньшую скорость прохождения фотонов через эту среду. В случае распространения в вакууме и, соответственно, при отсутствии столкновении (а следовательно, и задержек времени  $\tau_i$ ), формула (22) преобразуется в формулу (19) и показывает ту же скорость, равную известной величине  $C$ . Иными словами, общая логика зависимости скорости прохождения среды от угла отклонения в формуле (22) останется такой же, как в формуле (19).

#### Заключение

1. Выведена формула скорости распространения фотонов в среде, которая зависит от времени прилипания фотонов к ча-

стицам среды и от угла отклонения фотонов от первоначальной траектории, при их столкновении с частицами среды.

2. Показано, что чем больше время прилипания и угол отклонения фотонов, тем меньше скорость распространения потока фотонов в данной среде. И наоборот, чем

меньше время прилипания и угол отклонения, тем больше скорость распространения фотонов в среде.

3. В случае отсутствия столкновений, как это наблюдается в вакууме, скорость фотонов максимальная и равна известной величине  $C$ .

#### Библиографический список

1. Отчет о научно-исследовательской работе 2021 г. по теме: «Распространение электромагнитных волн и их взаимодействие с веществом», раздел 3: «Развитие новых теоретических подходов, методов и алгоритмов оптики и нанотехнологий в задачах дистанционного зондирования, хранения и решения технологических задач для народного хозяйства Кыргызской республики», глава 3: «Аспекты теории виртуальных частиц в области электромагнитного излучения и структуры элементарных частиц». – С. 79-86.

2. Отчет о научно-исследовательской работе 2017 г. по теме: «Исследования и разработка структур и методов обработки и хранения аэрокосмической видеoinформации для народнохозяйственных задач Кыргызской республики», глава 3: «Волновые свойства фотонов». – С. 53-55.

3. Раимкулов М.Н. Зависимость угла преломления фотонов от оптической среды // Евразийское научное объединение. – 2019. – № 9. – С. 19-27.

4. Раимкулов М.Н. Зависимость угла преломления от диаметра фотонов // Евразийское научное объединение. – 2020. – № 10. – С. 17-22.

### MATHEMATICAL DEPENDENCE OF THE PHOTON PROPAGATION VELOCITY ON THE OPTICAL MEDIUM

**M.N. Raimkulov**, *Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Leading Researcher Institute of Seismology of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic (Kyrgyzstan, Bishkek)*

**Abstract.** *This article discusses the principle on the basis of which the refraction of the photon flux occurs during the transition from one medium to another. It is shown that the angle of refraction is directly related to the diameter of the photon (wavelength). Based on this principle of refraction, the principle of photon propagation in the medium is proposed. It is shown that the propagation velocity in the medium depends on the angle of deviation of photons from the initial direction of motion, which leads to an increase in the path of photons in the medium and, as a consequence, to an increase in the time of passage of a medium of a certain thickness. And, based on the proposed principles of refraction and propagation, the mathematical dependence of the photon velocity on the optical medium in which they propagate is derived.*

**Keywords:** *photons, velocity, refraction, medium, propagation, the photon propagation velocity, optical medium, photon refraction principle.*