ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ СВЕТА В МУТНЫХ СРЕДАХ*)

Проблема распространения света в мутных средах, связанная с учётом многократного рассеяния, имеет чрезвычайно большое значение в целом ряде отраслей науки и техники. Вместе с тем, несмотря на обилие работ в этой области, она ещё очень далека от разрешения. Причину такого положения вещей следует видеть в крайней запутанности явлений, сопровождающих распространение света в мутной среде, следствием чего является как сложность математической трактовки, так и трудность экспериментального исследования. В результате и теоретические предпосылки, и экспериментальные методы обычно приходится подвергать столь сильному упрощению, что получаемые при их помощи результаты оказываются сравнительно малозначащими. Выход, очевидно, состоит в проведении ряда развёрнутых комплексных исследований, позволяющих охватить проблему не односторонне, а достаточно широко. Поэтому появление достаточно обширных и развёрнутых исследований в этой области, подобных реферируемой работе, следует рассматривать как значительное событие.

Автор поставил перед собой задачу экспериментально исследовать распределение яркости в мутной среде, заполняющей бесконечное полупространство (т. е. достаточно большой объём), при различных условиях освещения. В качестве объекта были взяты среды с очень большим коэффициентом рассеяния и очень малым коэффициентом поглощения (разведённое молоко, канифольный золь, растворы мыла). Изучалась зависимость яркости B от направления наблюдения и от глубины погружения в среду. Измерения велись при помощи фотоэлектрических фотометров (с селеновым фотоэлементом). Фотометры использовались двух типов: трубочные и линзовые — входная плоско-выпуклая линза направляла световой поток на фотоэлемент; угол зрения ограничивался диафрагмой, размещавшейся в фокальной плоскости линзы. Отсчёты производились при помощи гальванометра (без усиления), причём было найдено, что показания гальванометра при малых освещённостях пропорциональны яркости. Угол зрения фотометров ω варьировал от 0°,39 до 10°,1. Коэффициент ослабления мутной среды K измерялся на спектрофотометре Кениг-Мартенса по

*) В. А. Тимофеева, Труды Морск. гидрофизич. ин-та АН СССР 3, 35 (1953).

ослаблению света при прохождении им кюветы определённой толщины. Измерения показали, что при оптической толщине слоя меньше 2 релеев (т. е. $Kl_1 \lesssim 2$, где l_1 — толщина слоя) хорошо выполняется закон Бугера;

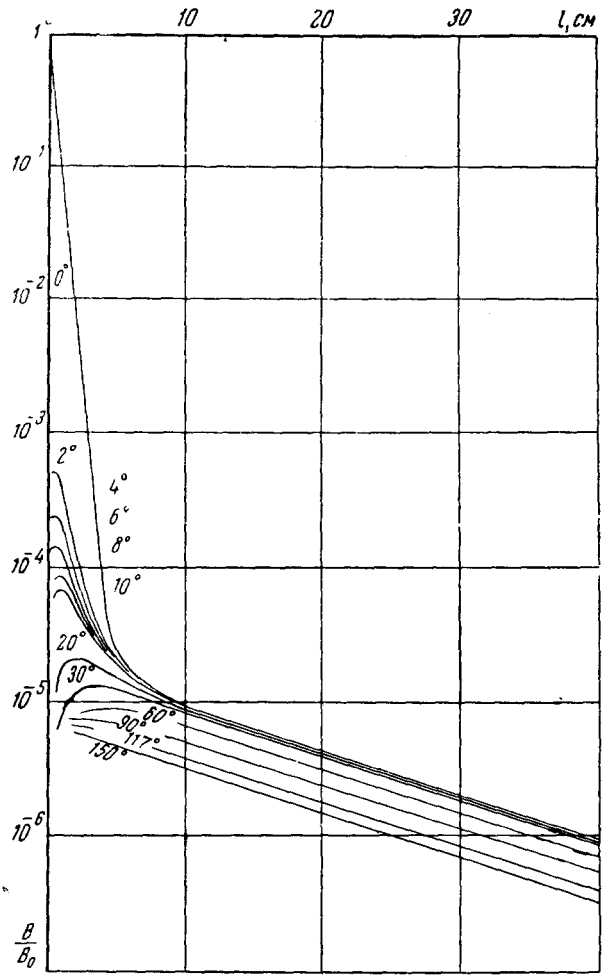

Рис. 1. Зависимость яркости B молочной среды ($K = 1{,}90$ $см^{-1}$, $\omega = 0°{,}39$) от глубины для различных углов наблюдения φ.

при бо́льших оптических толщинах слоя наступают заметные нарушения, очевидно, за счёт кратного рассеяния.

Измеряемая среда заполняла бак размером $50 \times 50 \times 20$ *см* (т. е. не слишком большой) и освещалась через люк в крышке бака прямыми вертикальными лучами Солнца (при помощи системы зеркал). Измерялась яркость под различными углами φ относительно направления в зенит

в функции глубины погружения фотометра. Общая картина распределения яркости в молочной среде ($K = 1{,}90$ *см*$^{-1}$, $\omega = 0°{,}39$) показана на рис. 1. Обращают внимание следующие обстоятельства: а) Для прямых лучей ($\varphi = 0$) яркость убывает с глубиной l по экспоненциальному закону $e^{-K_1 l}$ до некоторой глубины, соответствующей оптической толщине $K_1 l \sim 5$ релеев (измерения показали, что $K_1 \approx 1{,}15\ K$, где K измерялось на спектрофотометре). Затем скорость убывания яркости с глубиной уменьшается. б) При глубине порядка 12 релеев вновь устанавливается экспоненциальный закон убывания яркости вида $e^{-K'(l-l_0)}$, где (при 0,3 *см*$^{-1} < K <$ < 12 *см*$^{-1}$) $K' \approx \sqrt{AK}$ (рис. 2), A — параметр среды, зависящий, по мне-

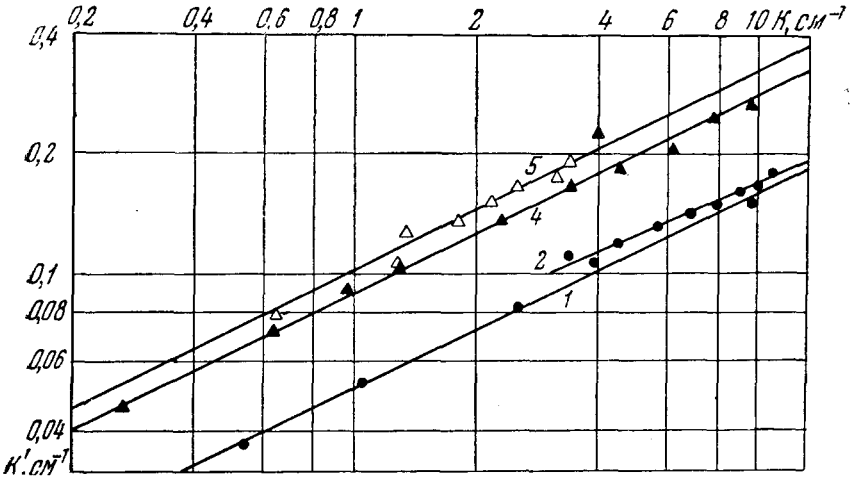

Рис. 2. Зависимость коэффициента ослабления K' в стационарных условиях от коэффициента ослабления K для прямого луча.

нию автора, от размера рассеивающих частиц и коэффициента поглощения среды и по порядку величины равный 0,003—0,01 для различных сред; l_0 — некоторый параметр среды (согласно измерениям $Kl_0 \sim 10 \div 12$ релеев); в) при $0° < \varphi \lesssim 120°$ яркость вначале возрастает (от некоторого начального значения) и по достижении максимума начинает убывать. При $120° \lesssim \varphi < 180°$ возрастания яркости не наблюдается — яркость монотонно убывает с глубиной; г) начиная с глубины порядка 10—12 релеев устанавливается экспоненциальное спадание яркости с глубиной по закону $e^{-K'(l-l_0)}$, причём K' не зависит от φ и имеет то же значение, что и для $\varphi = 0$, а Kl_0, оставаясь попрежнему порядка 12 релеев, несколько зависит от φ.

На рис. 3 показаны полярные диаграммы яркости на различных глубинах для случая рис. 1. Вверху указаны соответствующие значения глубины l в *см*; цифры внизу показывают значения яркости при $\varphi = 0$, причём за единицу принята яркость при $\varphi = 180°$ у поверхности ($l = 0$). Полярные диаграммы для $l = 20$ *см* и $l = 40$ *см* увеличены в 10 раз. При рассмотрении рис. 3 обращают внимание следующие особенности:

а) при малых l полярная диаграмма имеет грибообразную форму, свидетельствующую о сильной вытянутости индикатриссы рассеяния;

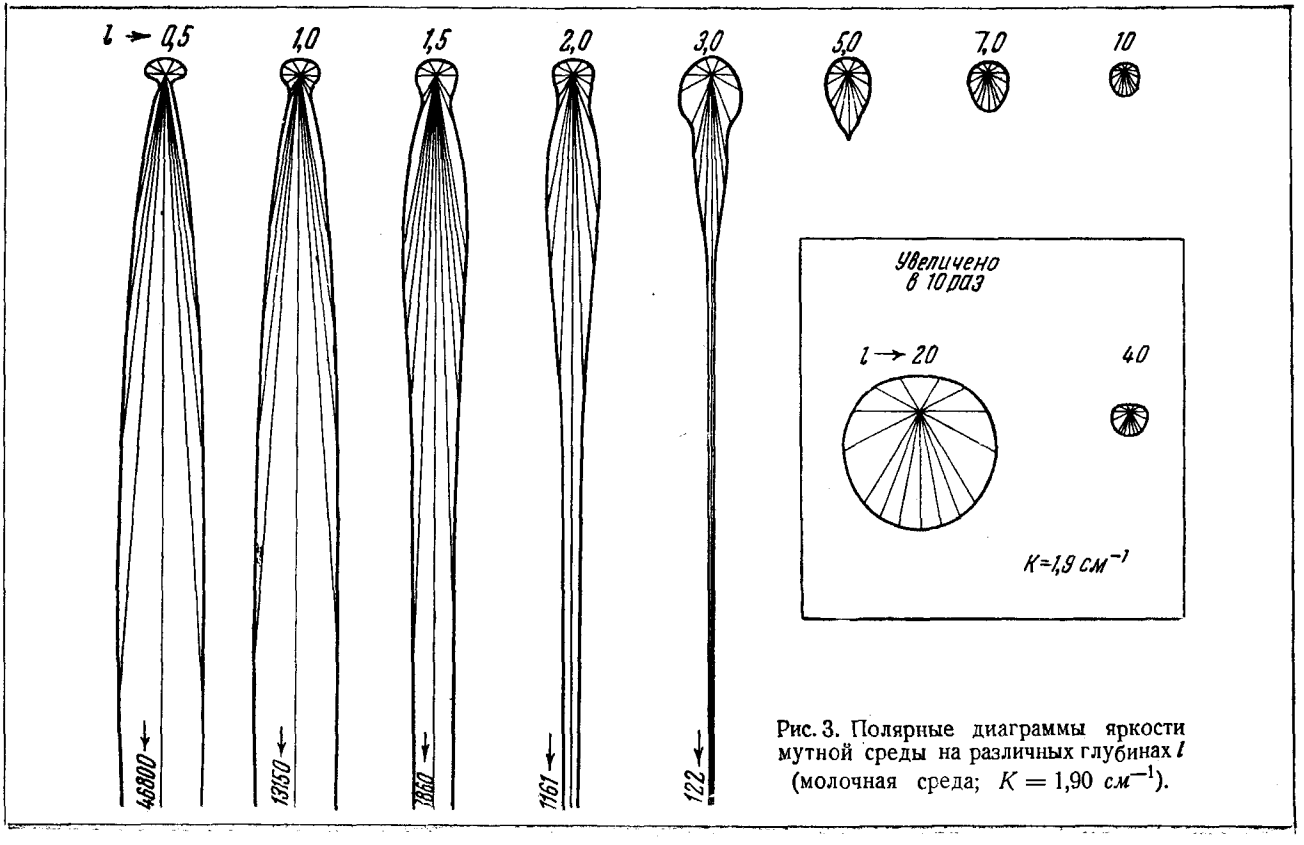

Рис. 3. Полярные диаграммы яркости мутной среды на различных глубинах l (молочная среда; $K = 1{,}90$ $см^{-1}$).

б) ослабление прямого пучка по мере его проникновения вглубь среды сопровождается нарастанием яркости света, рассеянного в направлениях $\varphi < 120°$ — нижняя часть «головки» полярной диаграммы увеличивается, в то время как верхняя часть «головки» ($\varphi > 120°$) остаётся сначала практически неизменной, а затем начинает уменьшаться;

в) начиная с глубины $l \approx 6$ *см* ($Kl \sim 12$), прямой луч практически исчезает, но остаётся ещё некоторая вытянутость диаграммы яркости вперёд, исчезающая на глубине около 14 *см* ($Kl \approx 25$). На этой глубине

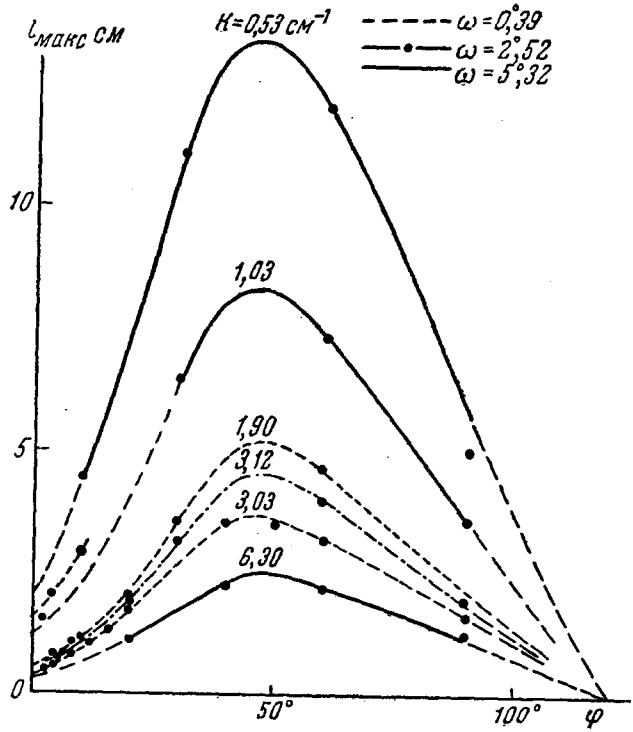

Рис. 4. Глубина залегания максимума яркости как функция угла наблюдения φ для различных значений коэффициента ослабления K. Измерения велись при различных углах зрения фотометра ω.

устанавливается стационарное распределение яркости по углам — при дальнейшем увеличении глубины форма полярной диаграммы яркости остаётся практически неизменной;

г) установление стационарного распределения яркости по углам соответствует установлению экспоненциального закона убывания яркости с глубиной с коэффициентом ослабления K', не зависящим от φ.

Как уже указывалось, для $0 < \varphi \lesssim 120°$ яркость сначала растёт, а затем убывает. Глубина залегания максимума зависит от φ (рис. 4), а также от коэффициента ослабления K среды (рис. 5), причём имеет место соотношение $l_{макс} K^{\sigma} = \text{const}$ (чем определяется величина σ, автор не выяснял).

Любопытно, что при $\varphi = 0$ максимум располагается не у поверхности, а на глубине, приближённо определяемой соотношением $l_{макс} = \frac{1}{K}$.

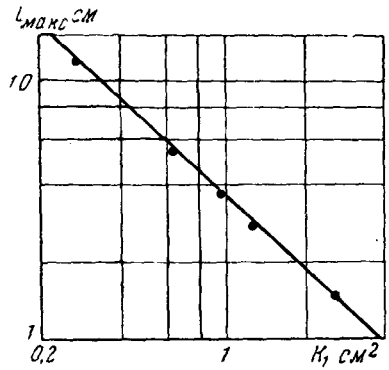

Рис. 5. Зависимость глубины залегания максимума яркости от коэффициента ослабления K для $\varphi = 30°$ (канифольный золь).

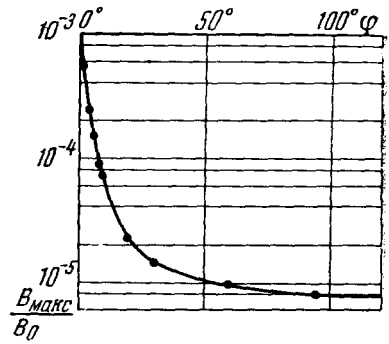

Рис. 6. Зависимость относительной величины максимума яркости от угла наблюдения φ.

Относительная величина максимальной яркости $\frac{B(\varphi)_{макс}}{B(\varphi)_{l=0}}$ зависит от φ (рис. 6), но, повидимому, не зависит от K (т. е. концентрации).

На основании данных измерения яркости $B(\varphi)$ можно было найти световые потоки, приходящие в данную точку со всех сторон (Φ), а также сверху $\Phi_{\downarrow}$ и снизу $\Phi_{\uparrow}$. Зависимость Φ от глубины показана на рис. 7.

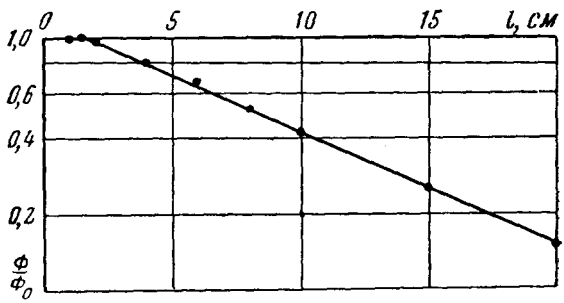

Рис. 7. Изменение с глубиной светового потока Φ, приходящего в данную точку со всех сторон (Φ пропорционален объёмной плотности световой энергии в данной точке). Молочная среда; $K = 2{,}3$ $см^{-1}$; $K' = 0{,}093$ $см^{-1}$.

На рис. 8 показана зависимость от глубины освещённости горизонтальной поверхности сверху ($E_{\downarrow}$), измеренной путём погружения на соответствующие глубины фотоэлемента известной площади. (Величина $E_{\downarrow}$ не совпадает

с $\Phi_{\downarrow}$; соотношение между этими величинами зависит от формы полярной диаграммы яркости.) Коэффициент ослабления освещённости с глубиной несколько убывает по мере увеличения глубины.

Из рис. 3 видно, что стационарная полярная диаграмма яркости имеет форму, близкую к сферической, причём полюс довольно значительно сдви-

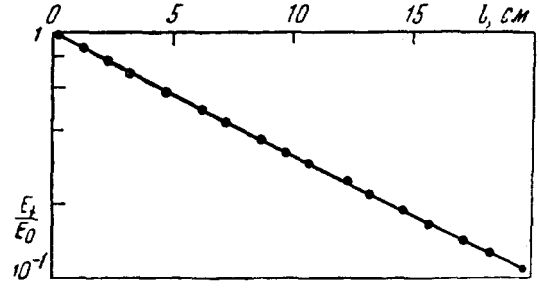

Рис. 8. Изменение с глубиной освещённости горизонтальной поверхности сверху. Молочная среда; $K = 1{,}54$ $см^{-1}$.

нут в сторону поверхности. Это соответствует тому факту, что световой поток, направленный вверх, значительно меньше светового потока, направленного вниз. Различие этих потоков обусловлено поглощением излу-

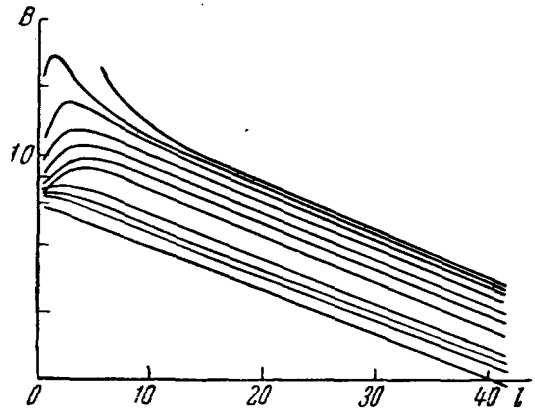

Рис. 9. Зависимость яркости мутной среды от глубины для различных углов наблюдения при одновременном освещении косыми лучами Солнца и рассеянным светом неба. Канифольный золь; $K = 1{,}3$ $см^{-1}$.

чения в нижележащих слоях. Даже при очень малом коэффициенте поглощения доля энергии, поглощаемая нижележащими слоями, велика. В случае молока она достигает, например, $\sim 60\%$ и практически не изменяется с глубиной. Увеличение коэффициента поглощения среды (путём добавления красителя), повидимому, мало влияет на почти сферическую форму стационарной диаграммы яркости, но, согласно измерениям автора, заметно

смещает полюс диаграммы в сторону поверхности, т. е. увеличивает долю энергии, поглощаемой в нижележащих слоях.

Специальные опыты показали, что коль скоро диаграмма яркости отклоняется от сферической симметрии, результаты измерений зависят от угла зрения фотометра ω. Вследствие этого в большинстве случаев необходимо вести измерения при очень малых углах зрения.

Помимо измерений с вертикальным освещением прямыми лучами Солнца, были проведены измерения с освещением мутной среды косыми лучами Солнца и рассеянным светом неба.

На рис. 9 представлены результаты для канифольного золя с $K = 1{,}3$ $см^{-1}$ (различные кривые соответствуют различным углам φ). На рис. 10 показано сечение диаграммы яркости на глубине $l = 0{,}5$ $см$ плоскостью вертикала Солнца для молочной среды с $K = 2$ $см^{-1}$. Прежде

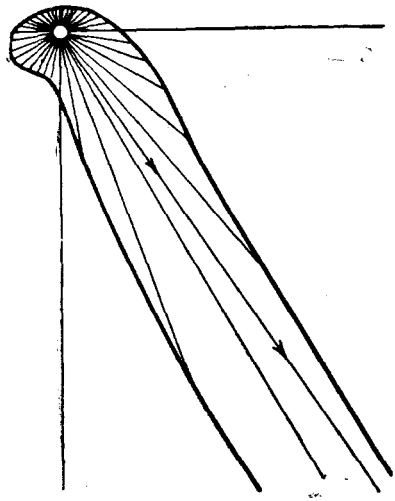

Рис. 10. Полярная диаграмма яркости (в плоскости вертикала Солнца) при косом освещении. Глубина $l = 5{,}0$ $см$. Молочная среда; $K = 2$ $см^{-1}$.

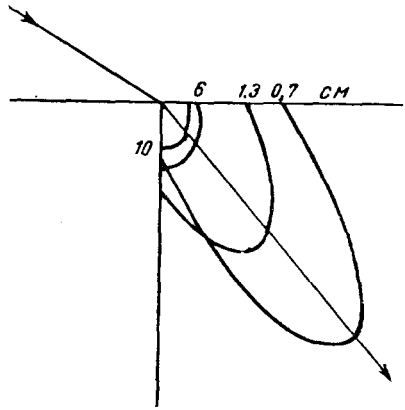

Рис. 11. Изменение с глубиной полярной диаграммы и направления максимальной яркости в случае освещения косыми лучами Солнца. Молочная среда; $K \approx 9$ $см^{-1}$.

всего обращает внимание, что общий характер кривых рис. 9 остаётся тем же, что и на рис. 3. На известной глубине (порядка 12 релеев) устанавливается стационарная форма полярной диаграммы яркости и при дальнейшем погружении вглубь среды яркость изменяется по экспоненциальному закону с коэффициентом ослабления K', не зависящим от φ. Однако полярные диаграммы в случае косого освещения несимметричны относительно направления освещающего луча. Более того, по мере погружения вглубь среды направление наибольшей яркости всё более отклоняется от направления освещающего луча и приближается к вертикали (рис. 11). Вследствие этого стационарная диаграмма яркости оказывается попрежнему симметричной относительно вертикали и не зависит от направления освещающего луча. При рассеянном освещении стационарное распределение яркости устанавливается на меньших глубинах.

Следует отметить, что ряд выводов автора нуждается в дополнительном исследовании. В частности, представляется, что найденная автором

зависимость K' от K может быть обусловлена влиянием стенок бака, в котором производились измерения (поглощение света стенками). Влияние стенок на величину K' установлено самим автором — при увеличении расстояния от стенок величина K' убывает. Соображения размерности показывают, что коэффициент A должен иметь размерность $см^{-1}$. Из рассмотрения уравнения переноса следует ожидать его пропорциональности коэффициенту поглощения (а следовательно, и концентрации) среды, т. е. в конечном счёте K, которое примерно равно коэффициенту рассеяния. В этом случае зависимость K' от K должна быть линейной. Найденные автором зависимости K' от K и K' от расстояния до стенки, вообще говоря, не исключают такой возможности.

Тем не менее реферируемая работа позволяет составить отчётливую картину распределения яркости в мутных средах при малых коэффициентах поглощения и больших коэффициентах рассеяния, а также выявляет основные имеющие здесь место зависимости. Это открывает значительные возможности как для рационального упрощения теоретической трактовки вопросов многократного рассеяния, так и для полуколичественных оценок, необходимых при решении практических задач.

Г. Р.