

УДК 535.361

© В. Б. Ильин<sup>1,2,3</sup>, В. Г. Фарафонов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

v.b.ilin@spbu.ru

## ПРЯМЫЕ ЗАДАЧИ РАССЕЯНИЯ СВЕТА В РАБОТАХ К.С. ШИФРИНА

Статья поступила в редакцию 02.09.2018, после доработки 13.02.2019

Рассматриваются исследования К.С. Шифрина, посвященные развитию и непосредственному применению точных и приближенных методов решения проблемы рассеяния света малыми частицами. Обсуждается роль монографии «Рассеяние света в мутной среде» (ГИТТЛ, 1951) и пятитомного издания «Таблиц по светорассеянию» (ГИМИЗ, 1966-73). Отмечены работы, рассматривающие очень большие или очень малые рассеивающие частицы, частицы с относительным показателем преломления близким к 1, двуслойные частицы и частицы с показателем преломления, непрерывно меняющимся вдоль радиуса, а также ряд иных работ, связанных с решением прямых задач светорассеяния.

**Ключевые слова:** рассеяние света малыми частицами.

© V. B. Il'in<sup>1,2,3</sup>, V. G. Farafonov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> St.-Petersburg State University, St.-Petersburg, Russia

<sup>2</sup> St.-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St.-Petersburg, Russia

<sup>3</sup> Main (Pulkovo) Astronomical Observatory RAS, St.-Petersburg, Russia

## DIRECT LIGHT SCATTERING TASKS IN WORKS OF K.S. SHIFRIN

Received 02.09.2018, in final form 13.02.2019

We consider the works of K.S. Shifrin devoted to development and applications of the rigid and approximate methods to solve the problem of light scattering by small particles. We discuss the impact of his book “Scattering of light in a turbid medium” and five volumes of “Tables of light scattering”. We note his papers on light scattering by very large and very small particles, particles with the refractive index  $m$  close to 1, core-mantle particles and particles with  $m$  continuously changing along the radius, as well as some other papers related to solution of the direct tasks in light scattering.

**Keywords:** light scattering by small particles.

Кусиель Соломонович Шифрин (1918–2011) внес значительный вклад в развитие теории рассеяния света малыми частицами, разработав в числе прочего ряд новых подходов к решению как обратных, о чем хорошо известно, так и прямых задач. Интерес Кусиеля Соломоновича к этой области был отчасти связан с обсуждением в Главной геофизической обсерватории (ГГО) практиковавшейся в то время защиты цитрусовых от утренних заморозков с помощью дымовой завесы. Считалось, что эффект достигается вследствие поглощения света и его переизлучения, однако, как выяснил К.С. Шифрин, основной вклад дает рассеяние. В той или иной степени решением прямых задач Кусиель Соломонович занимался почти всю свою жизнь.

Наиболее продуктивным в этом отношении был период 1946–1951 гг., когда прямые задачи были основным направлением исследований Шифрина, и когда были написаны важнейшие статьи по точным и приближенным методам решения различных (прямых) задач светорассеяния. По этим результатам была подготовлена первая монография и защищена докторская диссертация.

---

Ссылка для цитирования: Ильин В.Б., Фарафонов В.Г. Прямые задачи рассеяния света в работах К.С. Шифрина // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2019. Т. 12, № 2. С. 94–101.

For citation: Il'in V.B., Farafonov V.G. Direct light scattering tasks in works of K.S. Shifrin. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2019, 12, 2, 94–101.

DOI: 10.7868/S2073667319020126

Следующий, более протяженный период (примерно до окончания работы в ГГО в 1969 г.) характеризуется смещением интересов к обратным задачам, но включает и связанное с этим рассмотрение прямых задач, в частности, расчет обширных таблиц величин, необходимых для моделирования рассеяния света ансамблями частиц.

Во время работы в Институте океанологии (1969–1992 гг.) основное внимание уделялось не прямым задачам, и тем не менее в среднем одну статью в год Кусиель Соломонович им посвящал. При этом рассматривался очень широкий круг вопросов.

В последний период работы (1992–2010 гг., США) решение специфических прямых задач происходило примерно в том же темпе, что и раньше, вплоть до выхода Кусиеля Соломоновича на пенсию в 2003 г.

В данной статье мы подробнее рассмотрим перечисленные выше периоды, отметим основные работы, посвященные решению прямых задач светорассеяния и сравним первую книгу Кусиеля Соломоновича [1–2] с последующими монографиями других специалистов [3–6]. Заметим, что многие формальные и неформальные стороны научной деятельности Кусиеля Соломоновича хорошо отражены в сборнике [7], посвященном его 90-летию и содержащем его статьи и мемуары, практически полный список его публикаций и некоторые рецензии на них, а также воспоминания и большое число фотографий.



**Главная геофизическая обсерватория (ГГО) (1946–1951 гг.)** К началу работы Кусиеля Соломоновича теория рассеяния света малыми частицами находилась в «зачаточном состоянии». Посвященная ей литература сводилась к разрозненным статьям и небольшим таблицам, рассчитанным вручную. Система обозначений сильно менялась от автора к автору, и, что важнее, отсутствовали как обоснования использовавшихся подходов, так и проработка их деталей. Кроме этого, статьи, хоть и написанные крупными учеными, были обычно слабо связанными друг с другом. Например, работа лорда Релея [8], в которой начато рассмотрение широко известного приближения (в случае, когда размер рассеивающих частиц существенно меньше длины волны падающего излучения) написана в 1871 г., т.е. за 2 года до того, как Дж. Максвелл опубликовал свои уравнения [9]. Классическая работа Г. Ми [10], в которой в 1908 г. было предложено точное решение проблемы рассеяния света шарами, все еще выглядит весьма непривычно для современного читателя и т.д. Таким образом, за 75 лет, прошедших после упомянутой работы Релея, скопился весьма разнородный теоретический материал при отсутствии систематического взгляда на данный раздел физики.

Между тем оптические данные о рассеянии света в природных средах и, в частности, в атмосфере Земли настоятельно требовали приложений теории рассеяния света малыми частицами, которым, очевидно, должна была предшествовать большая работа по проверке, систематизации, дополнению и развитию данной теории. Эта работа была выполнена Кусиелем Соломоновичем на удивление быстро – менее чем за 5 лет.

Сначала он исследовал случай «оптически мягких» частиц, когда показатель преломления рассеивателей близок к показателю окружающей среды, т.е. относительный показатель  $m \sim 1$  [11–13]. В этих статьях был развит метод интегро-дифференциального уравнения и найдено простое решение для оптически мягких шаров и эллипсоидов, кстати, сравнительно близких к реальным частицам в атмосфере и гидросфере. В последующих работах была выявлена ошибка в теории Г. Ми, ее формулы были адаптированы для вычислений и проведены первые расчеты [14–15], развито приближение геометрической оптики (ГО), исследованы его частные случаи, выполнены детальные расчеты, проведено сравнение их результатов с экспериментальными данными [16–17], найден важный переход между общей теорией Г. Ми и приближением ГО [18], рассмотрены особенности излучения дисперсной среды [19].

В дополненной и обобщенной форме все эти работы вошли в монографию Кусиеля Соломоновича [1]. Отметим, что это первая книга в мировой литературе в данной области физики. В основном в ней

обсуждается рассеяние света однородными шарами, но одна из глав посвящена оптически мягким частицам произвольной формы. В монографии читатель находит глубокое рассмотрение физических аспектов и математических деталей теории, формулы для вычислений, таблицы с результатами расчетов и сравнение с данными наблюдений и экспериментов для реальных сред. Таким образом, монография представляет собой не справочник, а систематическое рассмотрение физической проблемы (рассеяния света малыми частицами) с акцентом на приложения. Благодаря этому книга выдержала конкуренцию с последующими монографиями [2–5] в течение трех десятилетий.

Монография Кузиеля Соломоновича по содержанию практически совпадает с его докторской диссертацией, защищенной в 1951 г. В отзывах на диссертацию, написанных академиком В.В. Шулейкиным и членом-корреспондентом Я.И. Френкелем и приведенных в [7], отмечены ее основные достоинства, которые действительно до сегодняшнего дня:

— предельно полно развит метод геометрической оптики (ГО) для шаров после учета нескольких ранее не рассматривавшихся эффектов (см. главу 5 в [1]);

— разработан подход, который в современной литературе называют Shifrin's method, — итерационный метод расчета оптических свойств частиц любой формы с показателем преломления, близким к показателю окружающей среды (см. главу 8 в [1]).

В целом диссертационная работа характеризовалась в отзывах словами: монументально, обширно, обстоятельно, оригинально и т.п.

**ГГО (1952–1969 гг.)** Лишь несколько статей, посвященных прямым задачам, были написаны Кузиелем Соломоновичем с 1952 г. до середины 1960-х гг. Однако затем была опубликована сравнительно большая серия работ широкой тематики. Были изучены рассеяние света двухслойными шарами [20], некоторые определенные интегралы, встречающиеся в теории рассеяния света [21], индикатрисы для больших шаров [22–23] и различных распределений шаров по размерам [24–27], световое давление на шары разного химического состава [28], взаимодействие сантиметрового излучения с каплями воды [29], рассеяние света абсолютно отражающими частицами [30]. Таким образом, совместно с соавторами Кузиель Соломонович рассматривал либо частные задачи, либо задачи, связанные с разработкой подходов к решению обратных задач и с подготовкой пятитомных «Таблиц по светорассеянию». Последние включали: т. 1. Угловые функции [31]; т. 2. Таблицы матриц рассеяния и составляющих рассеянного поля [32]; т. 3. Коэффициенты ослабления, рассеяния и лучевого давления [33]; т. 4. Рассеяние полидисперсными системами [34]; т. 5. Рассеяние света моделями морской воды [35].

Подобные таблицы были важным инструментом в «ранне-компьютерную» эпоху. Тома объемисты (до 400 стр.), поскольку для хорошей интерполяции таблицы были сделаны с малым шагом по параметрам. Например, в томе 3 для этого было решено около 50 000 прямых задач. Точность вычислений была порядка  $10^{-6}$ . Вычисления были проведены на ЭВМ М-20, имевшей скорость



20 000 опер./с, память  $\sim 25$  Кб(!) и занимавшей площадь  $200 \text{ м}^2$ . М-20 выпускалась с 1958 по 1964 г. (сделано всего  $\sim 50$  шт.) и была сравнима с тогдашними серийными IBM 704 (40 000 опер./с). Любопытно, что таблицы продавались на Западе без перевода и по невысокой цене. Однако в рецензиях, напечатанных в журнале *Applied Optics*, отмечалось большое мастерство авторов таблиц и то, что таблицы намного превосходят любые вышедшие ранее (см. подробнее [7]).

**Институт Океанологии (1970–80-е гг.)** В 1970-е гг. была рассмотрена лишь пара важных прямых задач:

1) Шифрин и Черняк [36] количественно показали, что при нагревании капель воды их тепловое излучение в микроволновой области уменьшается из-за уменьшения вязкости.

2) Буренков, Копелевич и Шифрин [37] распространили приближение [23] на случай больших оптически мягких шаров и получили новый вариант приближения аномальной дифракции.

В 1980-е гг. тематика решенных прямых задач снова расширилась. Были рассмотрены: рассеяние света системами частиц в приближении Релея-Ганса [38–39], отражение света от

нефтяных пленок разной толщины [40], дифракция на экране случайной формы [41], особенности рассеяния света шарами с убывающим наружу показателем преломления [42], оптические свойства частиц сложной структуры с использованием ансамблевого подхода [43], отражение света от морской (волнистой) поверхности [44]; были выполнены: расчеты показателя поглощения для разных ансамблей [45], уточнение приближений Релея-Ганса [46] и геометрической оптики [47] и т.д.

Из перечисленного следует особо выделить рассмотрение оптических свойств неоднородных шаров и развитие ансамблевого подхода:

1) К.С. Шифриным с соавторами была разработана модель так называемого «просветленного» шара, т.е. шара с однородным ядром и оболочкой, в которой показатель преломления радиально убывает наружу как  $m(r) \sim 1/r$  [42]. При определенных условиях требуемые вычисления были не значительно сложнее, чем в теории Г. Ми. Модель оказалась полезной при решении различных проблем, например, при моделировании реальных частиц [48] и ансамблей частиц сложной формы [43].

2) Развитие так называемого «ансамблевого» подхода началось с решения Шифриным и Микулинским задачи о рассеянии света ансамблем оптически мягких несферических частиц произвольной формы [38]. Было показано, как и при каких условиях расчет средней интенсивности света, рассеянного системой частиц, случайно распределенных в некотором объеме, можно заменить рассмотрением одной частицы случайной структуры. Позднее Шифрин и др. [43] применили такой подход, сопряженный с моделью просветленного шара, для аппроксимации оптических свойств реальных частиц (в частности, пористых межпланетных частиц) и достигли удовлетворительного согласия теории и наблюдений. В числе других приложений, Кокорин и Шифрин [48] применили аналогичный подход к системе хаотически ориентированных оптически мягких частиц и успешно смоделировали оптические свойства бактерий океанской взвеси.

**Орегонский университет (University of Oregon) (1992–2003 гг.).** В этот период был решен ряд интересных прямых задач, которые можно объединить в три группы:

1) Шифрин и Золотов [49] рассмотрели задачу рассеяния импульсов излучения однородным шаром и отметили важность учета времени накопления приемника. Был полностью исследован случай, когда это время больше длительности гауссова импульса, и найдены условия, при которых результаты существенно отличаются от предсказываемых теорией Г. Ми. В следующей работе [50] был рассмотрен случай, когда время накопления сигнала мало, и показано, что импульс рассеянного излучения может иметь весьма сложную структуру, зависящую от угла рассеяния и дифракционного параметра. Используя развитую теорию, Шифрин и Золотов [51] исследовали рассеяние импульсного микроволнового излучения на каплях воды в атмосфере и отметили важные эффекты, возникающие для импульсов очень короткой длительности.

2) В этот период была также опубликована самая цитируемая работа Кусиеля Соломоновича [52] (цитировалась и в 2017, и в 2018 г.). В ней были предложены простые соотношения для вычисления параметра Ангстрема, характеризующего волновую зависимость оптической толщины, как для многокомпонентной дисперсной среды, так и для простых дисперсных сред, состоящих из малых, больших или оптически мягких частиц. Позднее Шифрин и Золотов [53] рассчитали для большого числа моделей аэрозоля параметр Ангстрема и ослабление в видимой области, чтобы выяснить какую информацию о размерах частиц можно извлечь из этих данных.

3) Наконец, используя обобщенную модель просветленных шаров, Кокорин и Шифрин [54] рассмотрели оптические свойства ансамбля радиально-неоднородных частиц и для морской взвеси определили условия, при которых эти свойства чувствительны к внутренней структуре частиц. Кокорин и Шифрин [55–56] применили аналогичный подход для исследования влияния влажности на оптические свойства (в основном индикатрису) частиц сульфатной и солевой составляющих океанского аэрозоля.

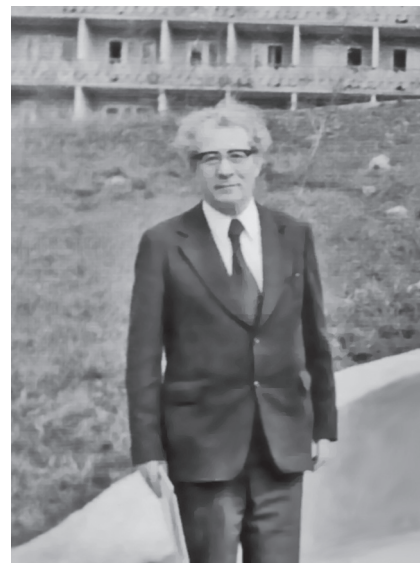






Рис. 4. Шифрин К.С. в своем «подвальном» кабинете

Fig. 4. Shifrin K.S. in his “basement” office.

**Заключение.** Как видим, даже прямых задач, решенных Кусиелем Соломоновичем, достаточно для признания его выдающимся специалистом в области оптики дисперсных сред. Однако рассмотренные прямые задачи часто представляли лишь базис для решения обратных задач, где вклад Шифрина поистине огромен.

Заметим, что просматривая современные астрофизические работы, все еще использующие однородные шары и сфероиды при моделировании рассеяния света космической пылью, читатель проникается уверенностью, что у замечательных работ Кусиеля Соломоновича еще будет вторая молодость.

*Работа частично поддержана грантами РФФИ 16-02-00194, 18-52-52006 и грантом СПбГУАП. Авторы благодарны Н.И. Кудрявцеву за помощь при подготовке фотографий.*

## Литература

1. Шифрин К.С. Рассеяние света в мутной среде. М.-Л.: ГТТИ, 1951. 288 с.
2. Shifrin K.S. Scattering of light in a turbid medium. Washington: NASA, 1968. 212 p.
3. van de Hulst H.C. Light scattering by small particles. New York: J.Wiley, 1957. 470 p.
4. Deirmendjian D. Electromagnetic scattering on spherical polydispersions. New York: Elsevier, 1969. 165 p.
5. Kerker M. The scattering of light and other electromagnetic radiation. New York: Academic Press, 1969. 666 p.
6. Bohren C.F., Huffman D.R. Absorption and scattering of light by small particles. New York: Wiley, 1983. 545 p.
7. Шифрин Я.С. Кусиель Соломонович Шифрин – Ученый, Учитель и Человек. Харьков: Контраст, 2008. 413 с.
8. Strutt J.W. (Baron Rayleigh) On the scattering of by small particles // Phil. Mag. 1871. V. 41, N 275. P. 447–454.
9. Maxwell J.C. A treatise of electricity and magnetism. Oxford: Clarendon Press, 1873. 866 p.
10. Mie G. Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen // Annal. Phys. 1908. V. 25, N 3. P. 377–445.
11. Шифрин К.С. Индикатриса рассеяния света палочкообразными и дискообразными частицами примеси в атмосфере // Труды ГГО. 1947. № 6. С. 3–16.
12. Шифрин К.С. К теории рассеяния света на примесях в атмосфере и гидросфере // Докл. АН СССР. 1948. Т. 59, № 3. С. 483–486.
13. Шифрин К.С. К теории рассеяния света в атмосфере // Труды ГГО. 1950. № 19. С. 255–287.
14. Шифрин К.С. Об одной ошибке при табулировании формул Ми // Изв. АН СССР, сер. геогр. геофиз. 1949. Т. 13, № 2. С. 165–167.
15. Шифрин К.С. Вывод формул для интенсивностей рассеяния естественного света из формул Ми // Труды ГГО. 1951. № 26. С. 75–78.
16. Шифрин К.С. Коэффициент рассеяния на больших частицах // Изв. АН СССР, сер. геогр. геофиз. 1950. № 1. С. 64–69.
17. Шифрин К.С. Рассеяние света на крупных каплях и поляризация света в радугах // Изв. АН СССР, сер. геогр. геофиз. 1950. № 2. С. 128–163.
18. Шифрин К.С. Рассеяние света на предельно большой прозрачной частице // Труды ГГО. 1951. № 26. 83–98.
19. Шифрин К.С. Тепловое излучение малых частиц // Докл. АН СССР. 1951. Т. 77, № 3. С. 399–402.
20. Шифрин К.С. Рассеяние света на двухслойной частице // Изв. АН СССР, сер. геоф. 1952. N 2. С. 15–20.

21. Шифрин К.С., Новосельцев Е.П. Вычисление некоторого класса определенных интегралов, содержащих квадрат бесселевой функции первого порядка // Труды ГГО. 1959. № 100. С. 25–36.
22. Шифрин К.С., Рабинович Ю.И. Спектральные индикатрисы крупных капель воды и спектральная поляризация радуг // Изв. АН СССР, сер. геоф. 1957. № 12, 1491–1507.
23. Шифрин К.С., Пунина В.А. Об индикатрисе рассеяния света в области малых углов // Изв. АН СССР, сер. физ. атм. океан. 1968. Т. 4, № 7. С. 783–791.
24. Шифрин К.С., Раскин В.Ф. К теории индикатрисы Рокара // Тр. ГГО. 1959. № 100. С. 3–14.
25. Шифрин К.С., Раскин В.Ф. Средняя индикатриса при гамма-распределении // Тр. ГГО. 1961. № 109. С. 161–167.
26. Шифрин К.С., Раскин В.Ф. Чувствительность полидисперсной индикатрисы к форме кривой распределения // Докл. АН СССР. 1961. Т. 137, № 1. С. 64–68.
27. Шифрин К.С., Чаянова Э.А. Индикатриса для распределения Юнге и типа Юнге // Тр. ГГО. 1965. № 170. С. 3–36.
28. Шифрин К.С. Световое давление на частицы разных веществ // Опт. Спектр. 1964. Т. 18, № 4. С. 690–697.
29. Шифрин К.С., Черняк М.М. Рассеяние и ослабление сантиметрового излучения каплями осадков // Тр. ГГО. 1967. № 203. С. 109–122.
30. Шифрин К.С., Золотова Ж.К. Поперечник рассеяния света абсолютно отражающими частицами под углом  $90^\circ$  // Тр. ГГО. 1966. № 184. С. 141–148.
31. Шифрин К.С., Зельманович И.Л. Таблицы по светорассеянию. Т. 1. Угловые функции. Л.: ГИМИЗ, 1966.
32. Шифрин К.С., Зельманович И.Л. Таблицы по светорассеянию. Т. 2. Таблицы матриц рассеяния и составляющих рассеянного поля. Л.: ГИМИЗ, 1968, 471 с.
33. Зельманович И.Л., Шифрин К.С. Таблицы по светорассеянию. Т. 3. Коэффициенты ослабления, рассеяния и лучевого давления. Л.: ГИМИЗ, 1968. 432 с.
34. Зельманович И.Л., Шифрин К.С. Таблицы по светорассеянию. Т. 4. Рассеяние полидисперсными системами. Л.: ГИМИЗ, 1971. 168 с.
35. Шифрин К.С., Салганик И.Н. Таблицы по светорассеянию. Т. 5. Рассеяние света моделями морской воды. Л.: ГИМИЗ, 1973. 219 с.
36. Шифрин К.С., Черняк М.М. Тепловое излучение капель воды в микроволновой области // Изв. АН СССР, сер. физ. атм. океан. 1974. Т. 10, № 10. С. 1107–1110.
37. Буренков В.Н., Копелевич О.В., Шифрин К.С. Рассеяние света крупными частицами с показателем преломления, близким к единице // Изв. АН СССР, сер. физ. атм. океан. 1975. Т. 11, № 8. С. 828–835.
38. Шифрин К.С., Микулинский И.А. Рассеяние света ансамблем «мягких» несферических частиц произвольной формы // Оптика моря / ред. Шифрин К.С. М.: Наука, 1983. С. 17–32.
39. Шифрин К.С., Микулинский И.А. Рассеяние света системой частиц в приближении Релея-Ганса // Опт. Спектр. 1982. Т. 52, № 2. С. 359–366.
40. Гуревич И.Я., Кокорин А.М., Шифрин К.С. Отражение оптического излучения нефтяными пленками переменной толщины // Океанол. 1982. Т. 22, № 4. С. 573–578.
41. Шифрин К.С., Шифрин Я.С., Микулинский И.А. Дифракция электромагнитной волны на экране случайной формы // Письма ЖТФ. 1984. Т. 10, № 2. С. 68–72.
42. Шифрин К.С., Перельман А.Я., Кокорин А.М. Рассеяние света двухслойными диэлектрическими частицами с непрерывными оптическими свойствами // Опт. Спектр. 1985. Т. 59, № 3. С. 597–602.
43. Шифрин К.С., Перельман А.Я., Кокорин А.М. Оптические свойства частиц сложной структуры. Ансамблевый подход // Письма ЖТФ. 1985. Т. 11, № 13. С. 790–794.
44. Шифрин К.С., Гардашов Р.Г. Интенсивность света, отраженного от морской поверхности // Изв. АН СССР, сер. физ. атм. океан. 1987. Т. 23, № 4. С. 415–422.
45. Смирнов А.В., Шифрин К.С. Поглощение света дисперсной системой // Коллоид. журн. 1987. Т. 49, № 4. С. 809–811.
46. Шифрин К.С., Тонна Г. Простая формула для поперечника поглощения слабо преломляющих частиц // Опт. Спектр. 1992. Т. 72, № 2. С. 668–669.
47. Золотова Ж.К., Шифрин К.С. Рассеяние и поглощение радиации крупными каплями воды в спектральной области 0.2–200 мкм // Изв. АН СССР, сер. физ. атм. океан. 1993. Т. 29, № 4. С. 532–536.
48. Кокорин А.М., Шифрин К.С. Влияние микрофизических характеристик бактерий на показатель рассеяния морской воды // Изв. АН СССР, сер. физ. атм. океан. 1993. Т. 29, № 1. С. 126–130.
49. Shifrin K.S., Zolotov I.G. Quasi-stationary scattering of electromagnetic pulses by spherical particles // Appl. Opt. 1994. V. 33, N 33. P. 7798–7804.
50. Shifrin K.S., Zolotov I.G. Nonstationary scattering of electromagnetic pulses by spherical particles // Appl. Opt. 1995. V. 34, N 3. P. 552–558.
51. Shifrin K.S., Zolotov I.G. Efficiencies for extinction and backscattering of a microwave pulse incident on water drops // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 1995. V. 33, N 2. P. 509–511.
52. Shifrin K.S. Simple relationships for the Ångström parameter of disperse systems // Appl. Opt. 1995. V. 34, N 21. P. 4480–4485.

53. *Shifrin K.S., Zolotov I.G.* Information content of the spectral transmittance of the marine atmospheric boundary layer // *Appl. Opt.* 1996. V. 35, N 24. P. 4835–4842.
54. *Кокорин А.М., Шифрин К.С.* Влияние внутренней структуры радиально-неоднородных частиц морской взвеси на индикатрису рассеяния и степень линейной поляризации // *Опт. журн.* 1998. Т. 65, № 9. С. 26–31.
55. *Кокорин А.М., Шифрин К.С.* Влияние влажности на характеристики рассеяния света радиально-неоднородным аэрозолем над морем // *Опт. журн.* 2000. Т. 67, № 1. С. 55–59.
56. *Кокорин А.М., Шифрин К.С.* Влияние влажности на индикатрису рассеяния в направлении назад ансамбля малых гигроскопичных неоднородных частиц // *Опт. журн.* 2003. Т. 70, № 5. С. 13–19.

## References

1. *Shifrin K.S.* Scattering of light in a turbid medium. *Moscow, GTTI*, 1951. 288 p. (in Russian).
2. *Shifrin K.S.* Scattering of light in a turbid medium. *Washington, NASA*, 1968. 212 p.
3. *van de Hulst H.C.* Light scattering by small particles. *New York, J. Wiley*, 1957. 470 p.
4. *Deirmendjian D.* Electromagnetic scattering on spherical polydispersions. *New York, Elsevier*, 1969. 165 p.
5. *Kerker M.* The scattering of light and other electromagnetic radiation. *New York, Academic Press*, 1969. 666 p.
6. *Bohren C.F., Huffman D.R.* Absorption and scattering of light by small particles. *New York, Wiley*, 1983. 545 p.
7. *Shifrin Ya.S.* Kusieli Solomonovich Shifrin – Scientist, Teacher and Person. *Kharkov, Contrast*, 2008. 413 p.
8. *Strutt J.W. (Baron Rayleigh).* On the scattering of by small particles. *Phil. Mag.* 1871, 41, 275, 447–454.
9. *Maxwell J.C.* A treatise of electricity and magnetism. *Oxford, Clarendon Press*, 1873. 866 p.
10. *Mie G.* Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen. *Annal. Phys.* 1908, 25, 3, 377–445.
11. *Shifrin K.S.* Light scattering function for stick-like and disk-like admixture particles in atmosphere. *Trudy GGO.* 1947, 6, 3–16 (in Russian).
12. *Shifrin K.S.* On theory of light scattering on admixtures in atmosphere and hydrosphere. *Dokl. Akad. Nauk USSR.* 1948, 59, 3, 483–486 (in Russian).
13. *Shifrin K.S.* To theory of light scattering in atmosphere. *Trudy GGO.* 1950, 19, 255–287 (in Russian).
14. *Shifrin K.S.* On an error in tabulation of Mie formulae. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr. Geofiz.* 1949, 13, 2, 165–167 (in Russian).
15. *Shifrin K.S.* Derivation of formulae for intensity of natural light from Mie formulae. *Trudy GGO.* 1951, 26, 75–78 (in Russian).
16. *Shifrin K.S.* Coefficient of scattering by large particles. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr. Geofiz.* 1950, 1, 64–69 (in Russian).
17. *Shifrin K.S.* Scattering of light by large drops and light polarization in rainbows. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr. Geofiz.* 1950, 2, 128–163 (in Russian).
18. *Shifrin K.S.* Scattering of light on an extremely large transparent particle. *Trudy GGO.* 1951, 26, 83–98 (in Russian).
19. *Shifrin K.S.* Thermal radiation of small particles. *Dokl. Akad. Nauk USSR.* 1951, 77, 3, 399–402 (in Russian).
20. *Shifrin K.S.* Scattering of light by a two-layered particle. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geofiz.* 1952, 2, 15–20 (in Russian).
21. *Shifrin K.S., Novosel'tsev E.P.* Calculation of some class of definite integrals including a square of the Bessel function of the first kind. *Trudy GGO.* 1959, 100, 25–36 (in Russian).
22. *Shifrin K.S., Rabinovich Y.I.* Spectral scattering functions for large drops of water and spectral polarization of rainbows. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geofiz.* 1957, 12, 1491–1507 (in Russian).
23. *Shifrin K.S., Punina V.A.* On light scattering function in the region of small angles. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Fiz. Atmosh. Okean.* 1968, 4, 7, 783–791 (in Russian).
24. *Shifrin K.S., Raskin V.F.* To theory of Rocard scattering function. *Trudy GGO.* 1959, 100, 3–14 (in Russian).
25. *Shifrin K.S., Raskin V.F.* Mean scattering function for gamma-distribution. *Trudy GGO.* 1961, 109, 161–167 (in Russian).
26. *Shifrin K.S., Raskin V.F.* Sensitivity of polydispersion scattering function to shape of distribution curve. *Dokl. Akad. Nauk USSR.* 1961, 137, 1, 64–68 (in Russian).
27. *Shifrin K.S., Chayanova E.A.* Phase function for Junge distribution and Junge-type one. *Trudy GGO.* 1965, 170, 3–36 (in Russian).
28. *Shifrin K.S.* Pressure of light on particles of various substances. *Opt. Spektrosk.* 1964, 18, 4, 690–697 (in Russian).
29. *Shifrin K.S., Chernyak M.M.* Scattering and extinction of centimeter radiation by raindrops. *Trudy GGO.* 1967, 203, 109–122 (in Russian).
30. *Shifrin K.S., Zolotova Z.K.* Light scattering cross-section for perfectly reflecting particles for the angle of 90°. *Trudy GGO.* 1966, 184, 141–148 (in Russian).
31. *Shifrin K.S., Zel'manovich I.L.* Tables on Light Scattering. Part 1. Angular functions. *Leningrad, GIMIZ*, 1966 (in Russian).
32. *Shifrin K.S., Zel'manovich I.L.* Tables on Light Scattering. Part 2. Tables of the Scattering Matrix and of the Components of the Scattered Electric Field. *Leningrad, GIMIZ*, 1968, 471 p. (in Russian).
33. *Zel'manovich I.L., Shifrin K.S.* Tables on Light Scattering. Part 3. Extinction, Scattering and Radiation Pressure Efficiencies. *Leningrad, GIMIZ*, 1968. 432 p. (in Russian).
34. *Zel'manovich I.L., Shifrin K.S.* Tables on Light Scattering. Part 4. Scattering by polydispersed systems. *Leningrad, GIMIZ*, 1971. 168 p. (in Russian).

35. Shifrin K.S., Salganik I.N. Tables on Light Scattering. Part 5. Light scattering by sea water models. *Leningrad, GIMIZ*, 1973. 219 p. (in Russian).
36. Shifrin K.S., Chernyak M.M. Thermal radiation of water drops in microwave region. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Fiz. Atmosh. Okean.* 1974, 10, 10, 1107–1110 (in Russian).
37. Burenkov V.N., Kopelevich O.V., Shifrin K.S. Light scattering of large particles with refractive index close to unity. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Fiz. Atmosh. Okean.* 1975, 11, 8, 828–835 (in Russian).
38. Shifrin K.S., Mikulinsky I.A. Light scattering by ensemble of “soft” nonspherical particles of arbitrary shape. *Optics of Sea*, ed. Shifrin K.S. *Moscow, Nauka*, 1983, 17–32 (in Russian).
39. Shifrin K.S., Mikulinsky I.A. Light-scattering by the system of particles in the Rayleigh-Hans approximation. *Opt. Spektrosk.* 1982, 52, 2, 359–366 (in Russian).
40. Gurevich I.Y., Kokorin A.M., Shifrin K.S. Optical radiation reflection by variable thickness oil films. *Okeanol.* 1982, 22, 4, 573–578 (in Russian).
41. Shifrin K.S., Mikulinsky I.A. Diffraction of electromagnetic waves on the screen of random shapes. *Pisma Zh. Tekhn. Fiz.* 1984, 10, 2, 68–72 (in Russian).
42. Shifrin K.S., Perel'man A.Y., Kokorin A.M. Light scattering by two-layered dielectric particles with continuous optical properties. *Opt. Spektrosk.* 1985, 59, 3, 597–602 (in Russian).
43. Shifrin K.S., Perel'man A.Y., Kokorin A.M. Optical properties of particles of a complex structure – ensemble approach. *Pisma Zh. Tekhn. Fiz.* 1985, 11, 13, 790–794 (in Russian).
44. Shifrin K.S., Gardashev R.G. Intensity of light scattered from the sea surface. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Fiz. Atmosh. Okean.* 1987, 23, 4, 415–422 (in Russian).
45. Smirnov A.V., Shifrin K.S. Light-absorption by a dispersed system. *Colloid J. USSR.* 1987, 49, 4, 726–728.
46. Shifrin K.S., Tonna G. Simple formula of absorption size across for lightly refracting particles. *Opt. Spektrosk.* 1992, 72, 2, 487–490 (in Russian).
47. Zolotova Z.K., Shifrin K.S. Scattering and absorption of radiation by large water droplets in spectral range 0.2–200 micron. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Fiz. Atmosh. Okean.* 1993, 29, 4, 532–536 (in Russian).
48. Kokorin A.M., Shifrin K.S. Influence of microphysical characteristics of bacteria on sea-water refraction index. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Fiz. Atmosh. Okean.* 1993, 29, 1, 126–130 (in Russian).
49. Shifrin K.S., Zolotov I.G. Quasi-stationary scattering of electromagnetic pulses by spherical particles. *Appl. Opt.* 1994, 33, 33, 7798–7804.
50. Shifrin K.S., Zolotov I.G. Nonstationary scattering of electromagnetic pulses by spherical particles. *Appl. Opt.* 1995, 34, 3, 552–558.
51. Shifrin K.S., Zolotov I.G. Efficiencies for extinction and backscattering of a microwave pulse incident on water drops. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 1995, 33, 2, 509–511.
52. Kokorin A.M., Shifrin K.S. Effect of the internal structure of radially inhomogeneous particles of a marine suspension on the scattering distribution and the degree of plane polarization of scattered light. *J. Opt. Technol.* 1998, 65, 9, 703–708.
53. Kokorin A.M., Shifrin K.S. Influence of humidity on the light-scattering characteristics of radially inhomogeneous aerosol particles in the boundary layer over an ocean. *J. Opt. Technol.* 2000, 67, 1, 45–49.