

УДК 535.31; 535.36

# Алгоритм трассировки пучков для задачи рассеяния света на атмосферных ледяных кристаллах. Часть 2. Сравнение с алгоритмом трассировки лучей

А.В. Коношонкин<sup>1,2</sup>, Н.В. Кустова<sup>2</sup>, А.Г. Боровой<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 17.02.2015 г.

Рассматривается сравнение алгоритма трассировки пучков, позволяющего получить решение задачи рассеяния света на атмосферных ледяных кристаллических частицах в приближении геометрической оптики, с алгоритмами трассировки лучей российских и зарубежных авторов. Показано хорошее согласие результатов. Разработанный алгоритм находится в свободном доступе с открытым исходным кодом.

*Ключевые слова:* геометрическая оптика, алгоритм трассировки пучков, рассеяние света, ледяные кристаллы; geometrical optics, beam splitting algorithm, light scattering, ice crystals.

## Введение

Теоретическая основа алгоритма трассировки пучков представлена в работе [1]. Данный алгоритм позволяет получить решение задачи рассеяния света на крупных несферических частицах в приближении геометрической оптики [2, 3]. Несмотря на то что традиционно приближение геометрической оптики реализуется на основе алгоритма трассировки лучей [4–9], такой подход содержит ряд недостатков, связанных со стохастичностью расположения начальных лучей. Во многом его большая популярность обусловлена наличием в свободном доступе открытого алгоритма А. Маске [8].

В данной статье приводится сравнение разработанного авторами алгоритма трассировки пучков [10] с алгоритмами других зарубежных и отечественных авторов. Показано хорошее согласие полученных результатов. Отдельное внимание уделено достоинствам и ограничениям данного алгоритма.

Программный код алгоритма написан на языке C++ в виде удобной библиотеки с открытым исходным кодом, облегчающей внедрение алгоритма трассировки пучков в сторонний код. Алгоритм находится в свободном доступе [11].

## Отличия алгоритма трассировки пучков

В алгоритме трассировки лучей начальное положение лучей случайно, следовательно, решение получено в некотором доверительном интервале.

Определение этого интервала — отдельная непростая задача. Для уменьшения доверительного интервала необходимо существенно увеличивать количество трассируемых лучей, тем самым увеличивая время решения задачи. Основное преимущество алгоритма трассировки пучков заключается том, что полученное решение не содержит случайных исходных данных, следовательно, является в этом смысле точным, избавляя от необходимости проводить дополнительные исследования о достоверности данного решения.

Другое преимущество алгоритма трассировки пучков по сравнению с алгоритмами трассировки лучей — полностью детерминированная форма пучка, в то время как на основе большого количества вышедших лучей трудно решить задачу о границе пучка. Информация о геометрии пучка может быть полезна для решения широкого круга прикладных задач. Так, например, для учета дифракции необходимо провести интегрирование поля на поверхности частицы, в случае, когда известны границы пучков, интегрирование существенно упрощается [12].

Информация о форме пучка дает возможность производить адекватный учет его вклада в результирующую матрицу рассеяния. Так, например, пучки размерами меньше длины волны света могут быть обоснованно отброшены, поскольку не подчиняются законам геометрической оптики. А пучки, энергия которых меньше пороговой, можно отбросить в виду незначительности их вклада в решение задачи рассеяния. Сделать подобные допущения на основе информации об отдельном луче гораздо сложнее.

В алгоритме трассировки пучков возможна работа с отдельными пучками, что позволяет исследователю глубже понять физику происходящих процессов.

\* Александр Владимирович Коношонкин (sasha\_tvo@iao.ru); Наталья Валентиновна Кустова; Анатолий Георгиевич Боровой (bogovoi@iao.ru).

В качестве примера на рис. 1 представлены решения, полученные для хаотически ориентированной гексагональной призмы. Жирной линией показано полное решение задачи рассеяния, линией 1 – решение только для зеркальной компоненты, отраженной от одной шестиугольной грани, линией 2 – решение для всех зеркально отраженных пучков. Линиями 3 и 4 обозначены вклады от траекторий, образующих гало 22 и 46° соответственно. На данном примере с помощью метода трассировки пучков легко понять суть образования тех или иных оптических эффектов. Исследователь может проследить, в какой момент появился пучок, как менялись его геометрические и оптические характеристики при деформации или повороте частицы.

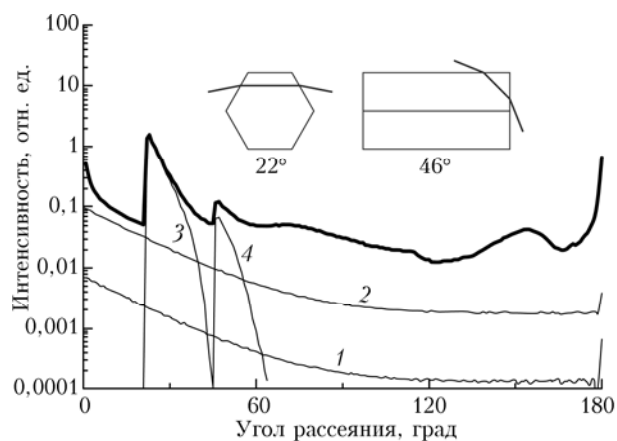


Рис. 1. Решение задачи рассеяния для хаотически ориентированной гексагональной призмы. Решение для всех траекторий с глубиной рекурсии, равной 10 (жирная линия). Вклады различных пучков (1–4). Диаметр частицы 60 мкм, высота – 150 мкм

Также информация о пучках как о целом позволяет легко производить как когерентное, так и некогерентное их сложение. Обычно необходимо выполнить когерентное сложение только для небольшого количества вышедших пучков, а остальные добавить некогерентно. В методе трассировки лучей такая операция крайне затруднительна.

Еще одним преимуществом алгоритма трассировки пучков является наличие всех необходимых данных для визуализации происходящего процесса. Так, например, на рис. 2, а показана визуализация отдельного пучка. Видны его траектория и поперечное сечение. На рис. 2, б представлена визуализация верхней полусферы направлений рассеяния, на которой точками обозначены направления выхода отдельных пучков. Визуализация процесса трассировки способствует пониманию сути происходящего.

Явное отличие в построении решения между методами трассировки лучей и трассировки пучков приводит к отличию в скорости получения решения. В общем случае метод трассировки пучков значительно превосходит по скорости метод трассировки лучей, поскольку в методе трассировки пучков трассируются только вершины пучков. Однако при увеличении глубины рекурсии метод трас-

сировки пучков замедляется намного быстрее метода трассировки лучей, так как на каждом этапе рекурсии образуется множество новых пучков, а луч может делиться только на два. Поэтому существует момент, когда алгоритм трассировки лучей может быть быстрее.

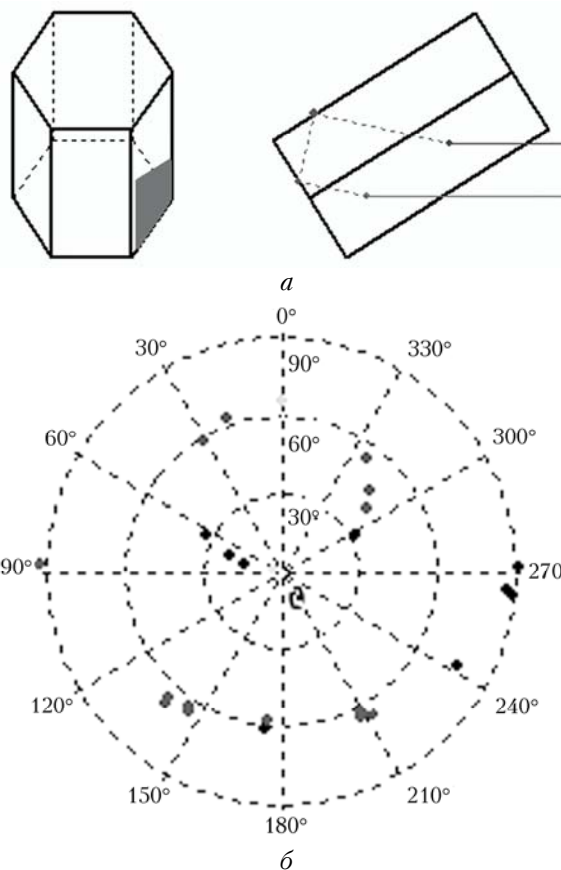


Рис. 2. Визуализация траектории отдельного пучка (а) и направлений выхода пучков (б)

Авторы алгоритма трассировки пучков планируют существенно увеличить скорость расчетов, развернув рекурсию в цикл и проведя работу над оптимизацией алгоритма.

Также стоит отметить, что с точки зрения конечного пользователя алгоритм трассировки пучков выглядит более привлекательным, поскольку написан в виде отдельной подключаемой библиотеки на языке C++ и, как следствие, существенно упрощает процесс внедрения данного метода в собственный проект. Вместе с алгоритмом трассировки пучков поставляется документация с подробным описанием всех используемых классов и функций.

Отдельно стоит сказать об ограничениях, присутствующих в текущей версии алгоритма трассировки пучков. На данный момент алгоритм может решать задачу рассеяния только на выпуклых частицах без учета поглощения. При этом не существует принципиальных ограничений для преодоления данных недостатков и исследователь может решить данные задачи самостоятельно, опираясь на открытый исходный код алгоритма.

## Сравнение с существующими решениями

Несмотря на то что применение метода геометрической оптики для решения задачи рассеяния света на ледяных кристаллических частицах началось еще в 1970-х гг. [4–9], в свободном доступе распространялись лишь несколько алгоритмов [7–9]. К сожалению, в настоящее время свободно доступен лишь код А. Маске [8] с последним обновлением в 1999 г.

В качестве тестовой решалась задача рассеяния света на хаотически ориентированном гексагональном ледяном столбике с диаметром основания

80 мкм и высотой 200 мкм. Показатель преломления принимался равным 1,332, поглощение не учитывалось. Для сравнения использовалась версия, размещенная на сайте [13] от 01.06.2014.

На рис. 3 представлены результаты сравнения алгоритма трассировки лучей (А. Маске) и алгоритма трассировки пучков на примере гексагональной частицы высотой  $L$  и диаметром  $d$ . Число трассируемых лучей в алгоритме трассировки лучей принималось равным 1000. Усреднение проводилось по 1 000 000 ориентаций частицы. Глубина рекурсии в обоих алгоритмах задавалась равной десяти. Результаты сравнения показывают отличное согласие.

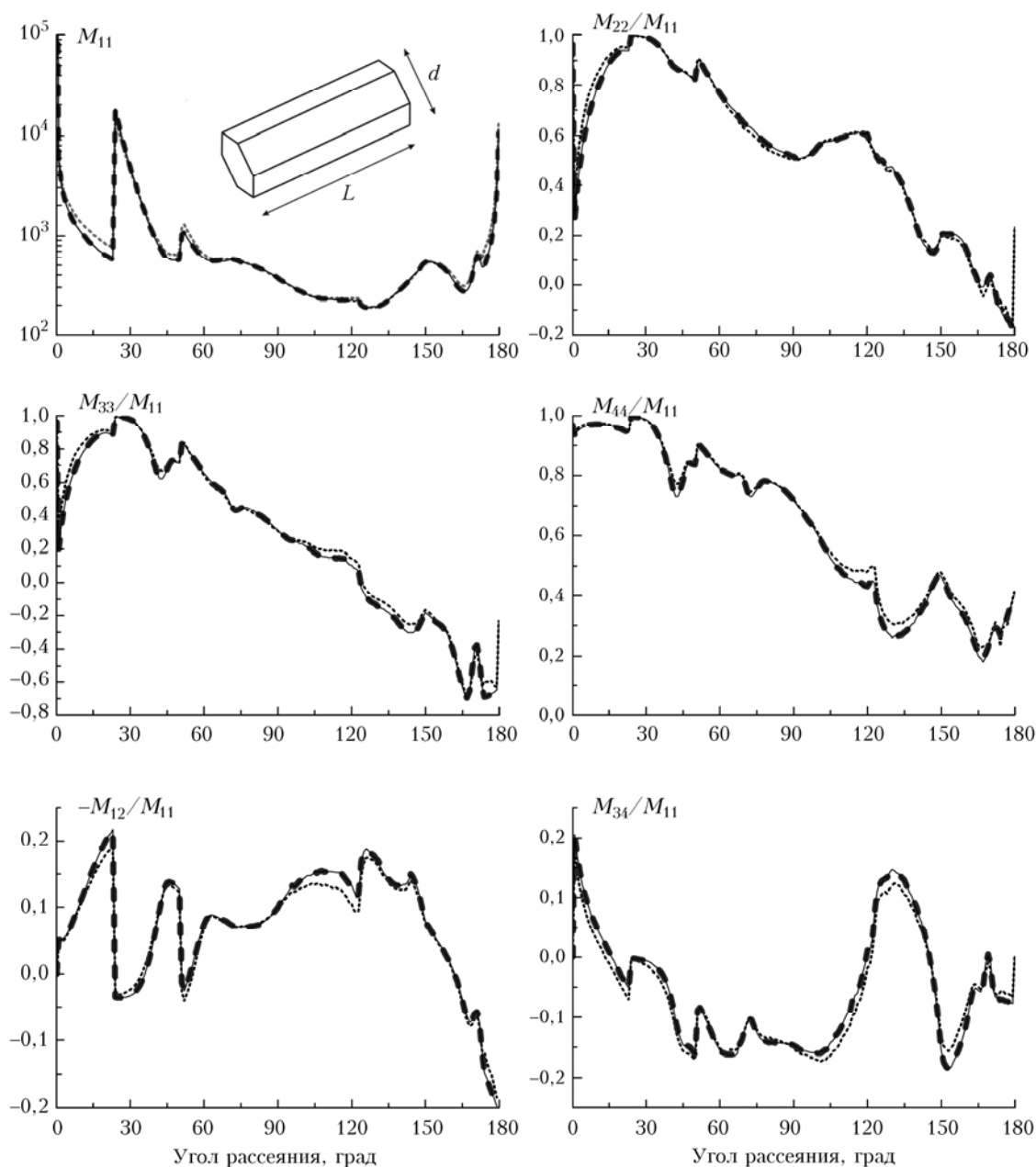


Рис. 3. Сравнение 6 элементов матрицы Мюллера, полученных методом трассировки пучков (сплошная линия) и методом трассировки лучей А. Маске (пунктирная линия). Метод трассировки лучей до исправления ошибки показан точками

Необходимо отметить, что в результате сравнения с алгоритмом трассировки пучков в алгоритме А. Маске была обнаружена ошибка в нормировке на площадь проекции частицы. Результаты, полученные до устранения ошибки, показаны на рисунке точками.

Результаты сравнения скорости работы алгоритмов представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1  
Время расчета (с) при глубине рекурсии, равной 5

Алгоритм	Количество ориентаций		
	100 000	1 000 000	10 000 000
Трассировка пучков	1 927	16 918	106 676
Трассировка лучей (1 000 начальных лучей)	2 048	31 546	229 171

Таблица 2  
Время расчета (с) при глубине рекурсии, равной 10

Алгоритм	Количество ориентаций		
	100 000	1 000 000	10 000 000
Трассировка пучков	11 339	88 220	667 949
Трассировка лучей (1 000 начальных лучей)	2 515	35 390	265 937

Анализ полученных результатов показывает, что при малой глубине рекурсии (меньше 5) алгоритм трассировки пучков выполняется быстрее алго-

ритма трассировки лучей, при увеличении глубины рекурсии ситуация меняется на противоположную.

Стоит отметить, что время работы алгоритма трассировки лучей линейно зависит от количества начальных лучей. При проведении тестового сравнения использовалось 1 000 начальных лучей. Однако большинство исследователей используют для решения 1 000 000 начальных лучей, что увеличивает время расчета методом трассировки лучей в 1 000 раз, и преимущество алгоритма трассировки пучков становится очевидным.

В литературе редко встречается решение задачи рассеяния света на кристаллических частицах перистых облаков, выполненное исключительно методом трассировки лучей. Как правило, авторы работ рассчитывают рассеянное поле в окрестности рассеяния вперед и назад с учетом дифракции, что приводит к отличию решений в этих окрестностях. Сравнение с одной из классических работ по задаче рассеяния Q. Cai и K.N. Liou [6] представлено на рис. 4.

Сравнение показало хорошее согласие. Стоит отметить: элементы  $M_{44}$ ,  $M_{33}$ ,  $M_{43}$  отличаются знаком, что вызвано различием в определении системы координат, также заметно различие в окрестности вперед и назад, обусловленное дифракционным вкладом. Для сравнения использовалась глубина рекурсии, равная 5. При увеличении глубины рекурсии решения начинают расходиться (заметно в окрестности  $45^\circ$ ), следовательно, в работе [6] глубина рекурсии была необоснованно занижена.

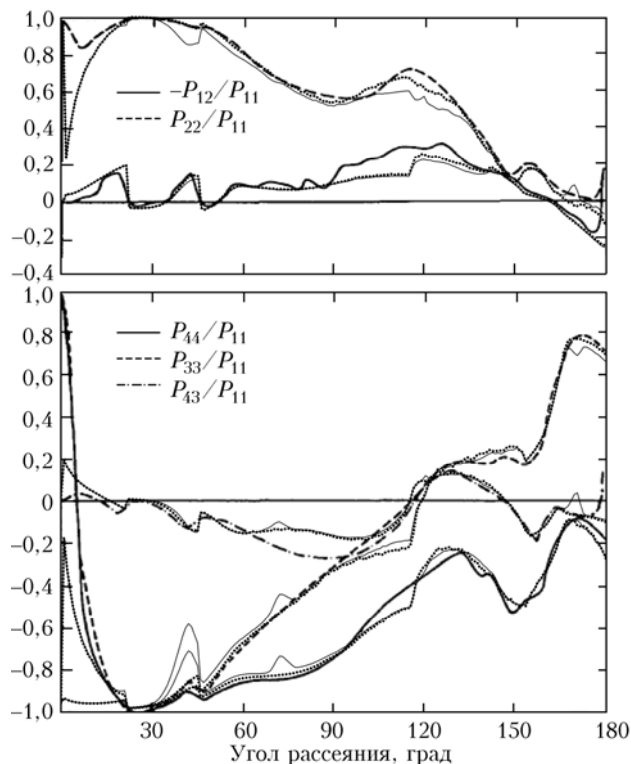
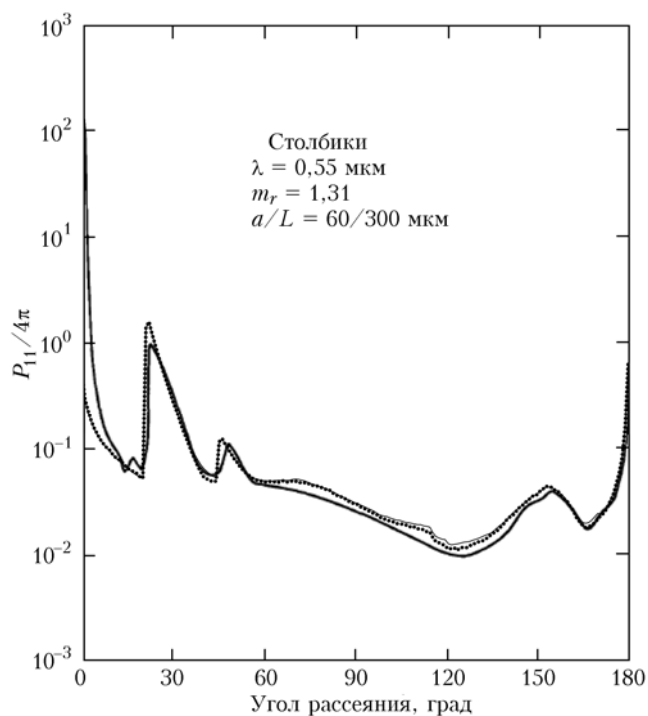


Рис. 4. Сравнение 6 элементов матрицы Мюллера, полученных методом трассировки пучков, с представленными в работе Q. Cai и K.N. Liou [6] (жирная линия). Метод трассировки пучков с глубиной рекурсии, равной 5, изображен точками, с глубиной рекурсии, равной 10, — тонкой сплошной линией

Большой интерес представляет сравнение решения с банком данных решений, построенным М. Несс [14], однако данный банк на момент написания статьи оказался недоступен и авторам удалось найти лишь одно решение, указанное в качестве примера в [15]. Сравнение решений приведено на рис. 5. Оно показало хорошее согласие результатов. Для сравнения использовалась глубина рекурсии, равная 10. Расхождения в окрестности рассеяния вперед и назад вызваны учетом дифракции и раз-

личием в определениях системы координат. Наличие биений в окрестности  $100\text{--}150^\circ$  явно указывает на недостаточно хорошее усреднение по ориентациям в решении М. Несс.

В России задачей рассеяния света на кристаллических частицах перистых облаков активно занимались А.Г. Петрушин [16], А.А. Попов [17, 18] и Д.Н. Ромашов [19], в настоящий момент занимается Б.В. Кауль [20]. Сравнение с результатами данных авторов также показало хорошее согласие.

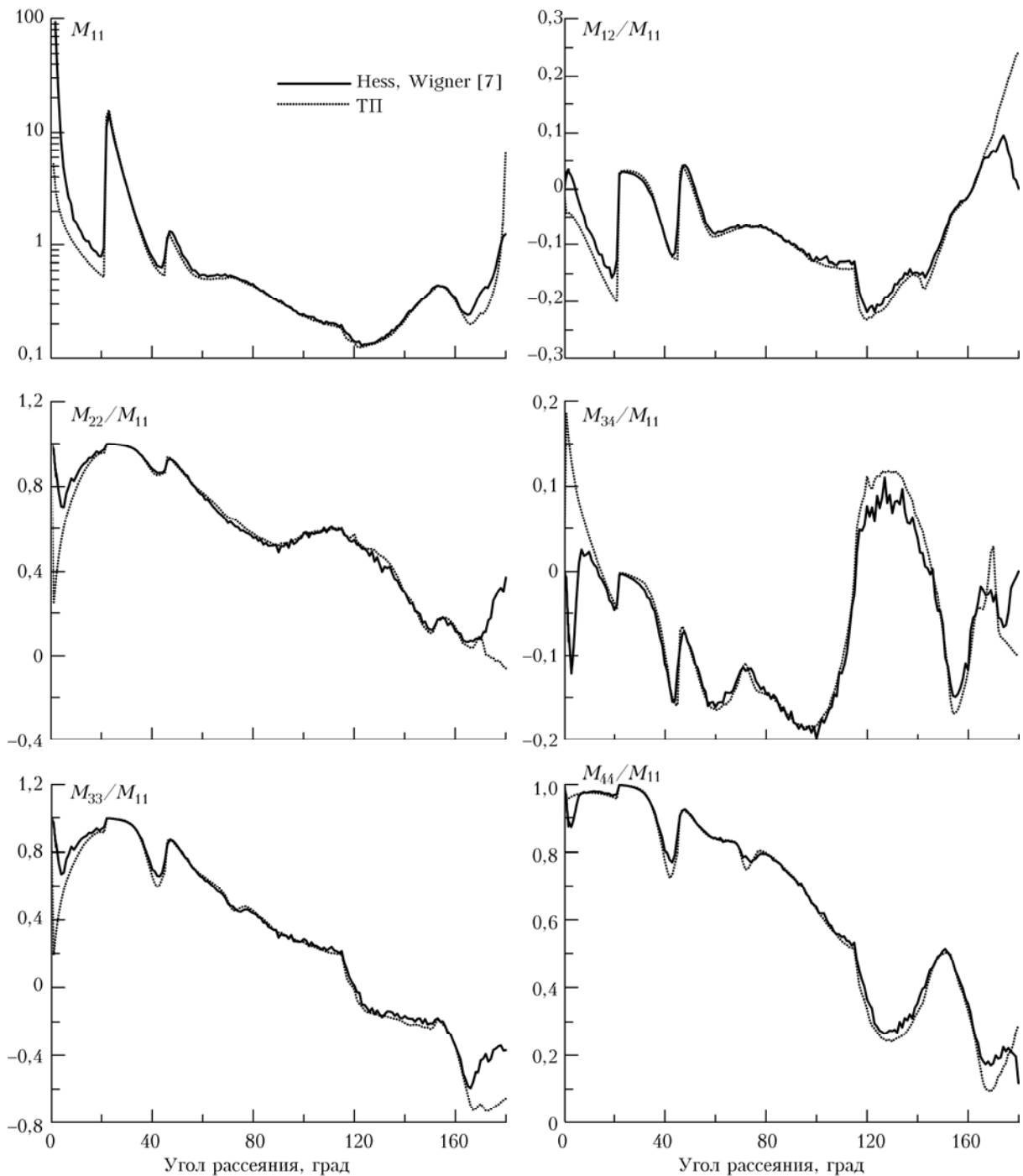


Рис. 5. Сравнение 6 элементов матрицы Мюллера, полученных методом трассировки пучков, с представленными в банке данных Несс, Wigner [7]. Метод трассировки пучков изображен точками

В качестве примера на рис. 6. представлено сравнение с алгоритмом трассировки пучков Д.Н. Ромашова, выполненным в приближении физической оптики.

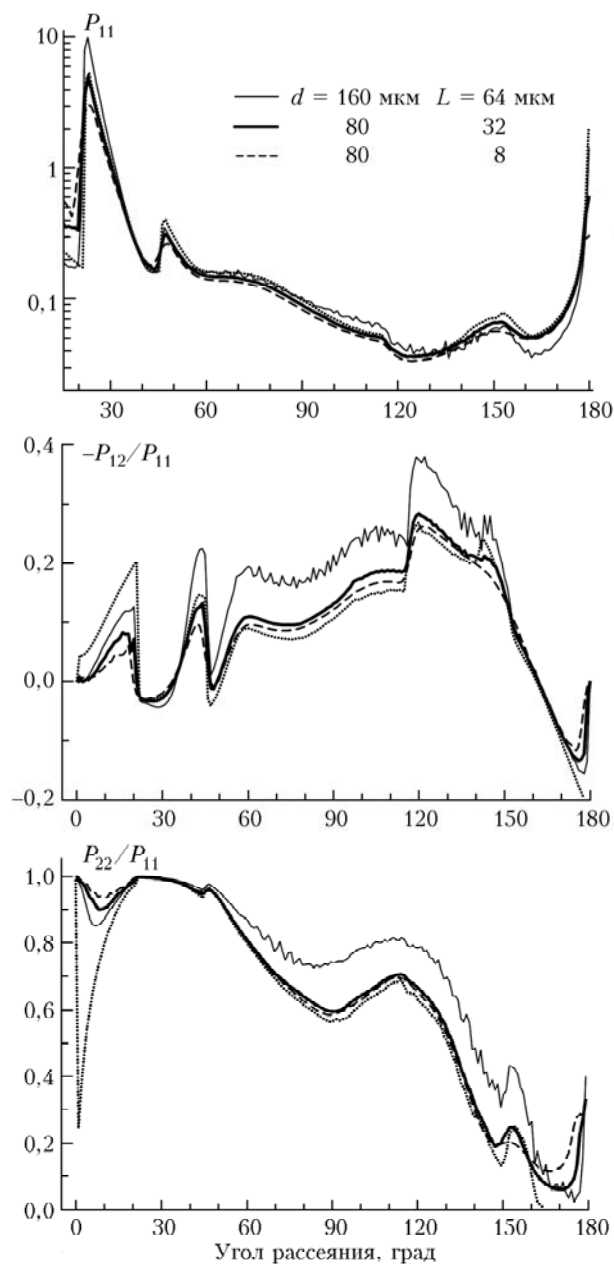


Рис. 6. Сравнение метода трассировки пучков с методом Д.Н. Ромашова [19]. Метод трассировки пучков изображен точками

По результатам сравнения видно хорошее согласие данных при глубине рекурсии, равной 5. Различия в окрестности вперед и назад обусловлены различием в определении системы координат и дифракционным вкладом. Отклонение результатов Д.Н. Ромашова для 160-микронной частицы (тонкая линия на рисунке) вызвано, скорее всего, недостаточным усреднением по ориентациям.

## Заключение

Подробное сравнение представленного в статье алгоритма трассировки пучков с уже имеющимися результатами как российских, так и зарубежных авторов, полученными методом трассировки лучей, продемонстрировало их хорошо согласие. Тестовые расчеты показали, что в общем случае метод трассировки пучков значительно превосходит по скорости метод трассировки лучей. Отсутствие многих недостатков, присущих методу трассировки лучей, делает метод трассировки пучков более привлекательным. Реализация алгоритма в виде отдельной библиотеки и наличие его в свободном доступе существенно облегчают его внедрение в сторонние проекты.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-05-06100а, частичной поддержке РНФ (соглашение № 14-27-00022), при поддержке гранта Президента РФ (МК-6680.2015.5) и Программы повышения конкурентоспособности ТГУ.

1. Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Боровой А.Г. Алгоритм трассировки пучков для задачи рассеяния света на атмосферных ледяных кристаллах. Часть 1. Теоретические основы алгоритма // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 4. С. 324–330.
2. van de Hulst H.C. Light Scattering by Small Particles. N. Y.: Dover, 1981. 470 p.
3. Takano Y., Liou K.N. Solar radiative transfer in cirrus clouds. Part I. Singlescattering and optical properties of hexagonal ice crystals // J. Atmos. Sci. 1989. V. 46, N 1. P. 3–19.
4. Wendling P., Wendling R., Weickmann H.K. Scattering of solar radiation by hexagonal ice crystals // Appl. Opt. 1979. V. 18, N 15. P. 2663–2671.
5. Jacobowitz H. A method for computing the transfer of solar radiation through clouds of hexagonal ice crystals // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 1971. V. 11, N 6. P. 691–695.
6. Cai Q., Liou K.N. Polarized light scattering by hexagonal ice crystals: Theory // Appl. Opt. 1982. V. 21, N 19. P. 3569–3580.
7. Hess M., Wiegner M. COP: A data library of optical properties of hexagonal ice crystals // Appl. Opt. 1994. V. 33, N 33. P. 7740–7746.
8. Macke A., Mueller J., Raschke E. Single scattering properties of atmospheric ice crystal // J. Atmos. Sci. 1996. V. 53, N 19. P. 2813–2825.
9. Muinonen K., Lamberg L., Fast P., Lumme K. Ray optics regime for Gaussian random spheres // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 1997. V. 57, N 2. P. 197–205.
10. Borovoi A.G., Grishin I.A. Scattering matrices for large ice crystal particles // J. Opt. Soc. Amer. A. 2003. V. 20, N 11. P. 2071–2080.
11. Алгоритм трассировки пучков. URL: <https://github.com/sasha-tvo/Beam-Splitting>
12. Borovoi A., Konoshonkin A., Kustova N. The physics-optics approximation and its application to light backscattering by hexagonal ice crystals // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2014. V. 146. P. 181–189.
13. Programms and Tools. URL: <http://tools.tropos.de/>

14. *Cirrus Optical Properties*, Enhanced version. URL: <ftp://ftp.lrz-muenchen.de/ub/science/meteorology/cirrus>
15. *COP: Cirrus Optical Properties*. URL: <http://opac.userweb.mwn.de/cirrus/cop/cop.html>
16. *Волковицкий О.А., Павлова Л.Н., Петрушин А.Г.* Оптические свойства кристаллических облаков. Л.: Гидрометеониздат, 1984. 198 с.
17. *Попов А.А.* Рассеяние электромагнитной плоской волны на полупрозрачном выпуклом многограннике произвольной формы // Изв. вузов. Физ. Деп. № 8006. 1984. 56 с.
18. *Popov A.A.* New method for calculating the characteristics of light scattering by spatially oriented atmospheric crystals // Proc. SPIE. 1996. V. 2822. P. 186–194.
19. *Ромашов Д.Н.* Рассеяние света гексагональными ледяными кристаллами // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14, № 2. С. 116–124.
20. *Balin Y., Kaul B., Kokhanenko G., Winker D.* Transformation of light backscattering phase matrices of crystal clouds depending on the zenith sensing angle // Opt. Exp. 2013. V. 21, N 11. P. 13408–13418.

*A.V. Konoshonkin, N.V. Kustova, A.G. Borovoi.* **Beam splitting algorithm for light scattering by atmospheric ice crystals. Part 2. Comparison with the ray tracing algorithm.**

In the work, we compare the beam splitting algorithm, providing a solution of light scattering problem of atmospheric ice crystal particles in the approximation of geometrical optics with the ray tracing algorithms developed by Russian and foreign authors. A good agreement of the results has been shown. The developed algorithm is freely available as an open source software.