

УДК 551.5

Статистическое моделирование эффектов, связанных с многократным рассеянием импульсов наземных и космических лидаров в облачной атмосфере

С.М. Пригарин*

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6*

Поступила в редакцию 23.05.2016 г.

Методом Монте-Карло изучаются особенности распространения лазерных импульсов и формирования лидарных эхосигналов при дистанционном зондировании облачности наземными и космическими лидарами. В частности, обнаружен эффект увеличения контрастности эхосигнала, который позволяет лучше «видеть» дальнюю границу облачности. Обсуждаются результаты статистического моделирования расширяющегося светового кольца, которое может возникать в облачном слое при прохождении сквозь него лазерного импульса. Кратко описываются возможности программного обеспечения, созданного автором для моделирования лидарных эхосигналов и представленного в сети Интернет.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, наземные и космические лидары, облачность, многократное рассеяние света, метод Монте-Карло; remote sensing, ground-based and spaceborne lidars, clouds, light multiple scattering, Monte Carlo simulation.

Введение

Лидарное зондирование является эффективным средством изучения оптических и микрофизических свойств рассеивающих сред. По этой причине решение соответствующих прямых и обратных задач вызывает значительный интерес у специалистов (см., например, [1–10]). В формировании лидарных эхосигналов существенную роль может играть многократное рассеяние излучения, которое необходимо учитывать при интерпретации результатов дистанционного зондирования. Для решения прямых задач о распространении лазерных импульсов с учетом многократного рассеяния в оптических средах широко используются методы Монте-Карло (см., например, [1–2, 5, 7, 8, 10, 11]).

В настоящей статье приведены результаты вычислительных экспериментов, проведенных с использованием программного обеспечения, созданного автором и частично представленного в свободном доступе в сети Интернет. Методом Монте-Карло вычисляются эхосигналы лидарного зондирования облачной атмосферы и пространственные распределения фотонов лазерного импульса, рассеянных облачной средой. Рассматриваются варианты бистатистических и моностатистических, наземных и космических лидаров. Обсуждаются эффекты, обусловленные присутствием в эхосигнале излучения высокой кратности рассеяния. Отметим, что данная статья

посвящена моделированию процессов переноса излучения без учета поляризации. Для вычисления лидарных эхосигналов методом Монте-Карло использовались простые локальные оценки, а пространственные распределения фотонов вычислялись с использованием оценок «по столкновениям». Строгие формулировки математических проблем, связанных с решением нестационарного уравнения переноса излучения, и описание приближенных методов решения на основе статистического моделирования (включая локальные оценки и оценки по столкновениям) представлены, например, в [11].

1. Статистическое моделирование временных эхосигналов наземных и космических лидаров

Вычислительные эксперименты проводились для облачного слоя с коэффициентом ослабления $0,02 \text{ м}^{-1}$ и индикатрисой рассеяния модели облака С1 из [12] для длины волны 530 нм. Взаимодействие фотонов с безоблачной атмосферой и поглощение в облаках не учитывались. На рис. 1 представлены результаты статистического моделирования эхосигнала наземного моностатистического лидара со следующими характеристиками: расстояние от лидара до облачного слоя 1000 м, высота облачного слоя 100 м (оптическая толщина 2), длина лазерного импульса 20 м, угол расходимости излучения источника 10 мрад, радиус кругового приемника 10 см. Ось лидара направлена перпендикулярно

* Сергей Михайлович Пригарин (sergeim.prigarin@gmail.com).

облачному слою, и предполагается, что импульс испускается лазерным источником в нулевой момент времени.

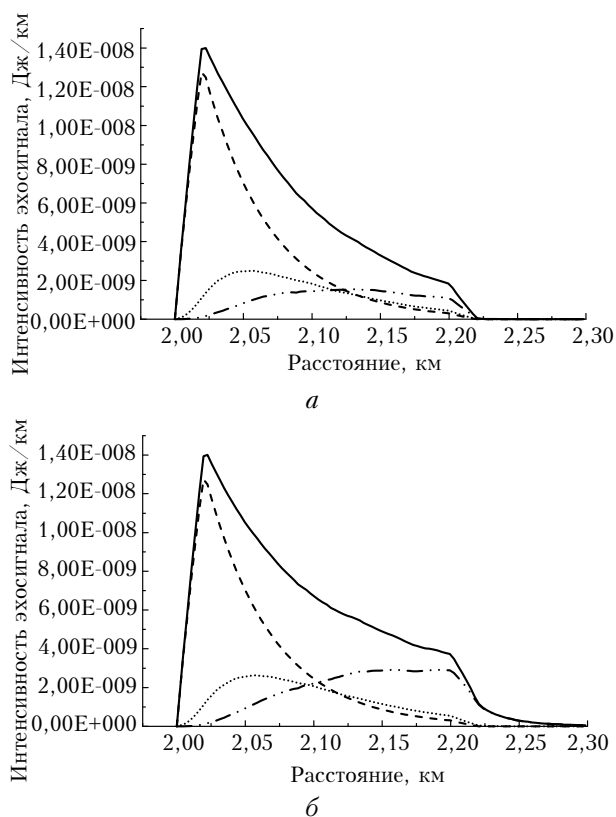


Рис. 1. Результаты статистического моделирования эхосигнала наземного моностатического лидара при зондировании облачного слоя высотой 100 м для поля зрения приемника 20 (а) и 200 мрад (б). Здесь и на рис. 2, 3: эхосигнал изображен сплошной кривой; вклад излучения с однократным рассеянием — штриховой кривой, с двукратным — пунктирной, а с кратностью 3 и выше — штрихпунктирной

На графиках представлены зависимости эхосигнала от времени. Для большей наглядности по оси ОХ отложено не время, а расстояние в километрах, которое свет проходит за соответствующее время. Таким образом, значение 2,00 км соответствует времени, которое требуется лучу света, чтобы пройти из источника до ближней границы облачности и вернуться в приемник, а значение 2,20 км соответствует дальней границе облачности. Результаты получены моделированием 10^8 траекторий фотонов, что потребовало около 10 мин вычислений на персональном компьютере. Относительная погрешность значений интенсивности эхосигнала, которая оценивалась по правилу трех сигм, составляет при этом около 5%. Заметим, что при увеличении поля зрения приемника растет вклад в эхосигнал излучения с высокой кратностью рассеяния. Интересно, что за счет этого на графике эхосигнала лучше «видна» дальняя граница облачности. То есть происходит в некотором смысле увеличение контрастности эхосигнала за счет многократного рассеяния излучения.

Аналогичный эффект наблюдается для спутникового зондирования: дальняя граница облачности «видна» на эхосигнале космического лидара (рис. 2) исключительно за счет многократно рассеянного излучения. На рис. 2 представлены результаты моделирования эхосигналов моностатических лидаров, находящихся на расстоянии 300 км от облачного слоя высотой 100 и 200 м. Поле зрения приемника лидара 20 мрад. Остальные параметры лидара и облачной среды те же самые, что и для ранее описанного вычислительного эксперимента.

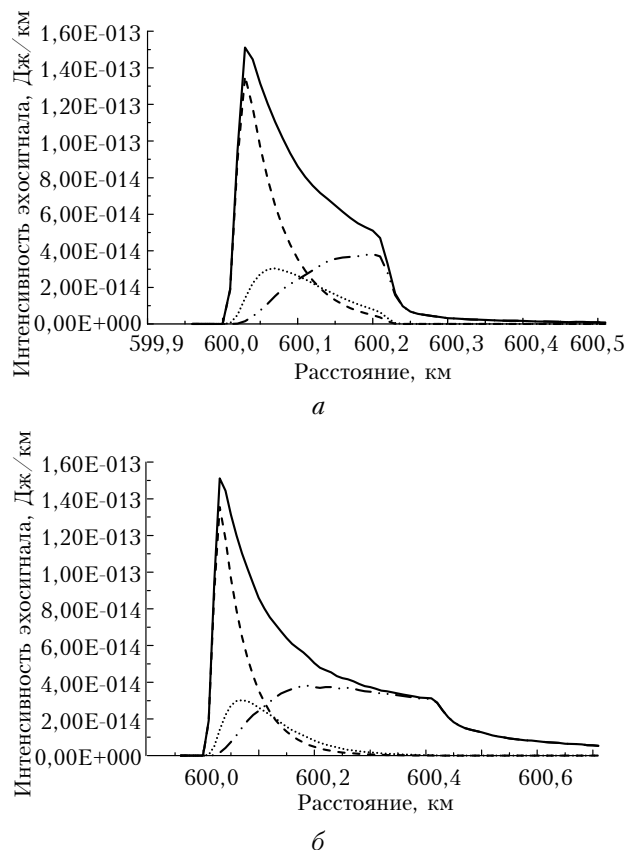


Рис. 2. Результаты статистического моделирования эхосигнала космического лидара при зондировании облачного слоя высотой 100 (а) и 200 м (б)

В формировании эхосигнала бистатического лидара многократное рассеяние, естественно, может играть еще более существенную роль. На рис. 3 представлены результаты моделирования эхосигнала наземного бистатического лидара и его компонент, соответствующих разной кратности рассеяния излучения. Здесь предполагается, что лидарные приемник и источник расположены на расстоянии 500 м друг от друга и на расстоянии 1 км от границы облачного слоя, высота которого 100 м. Оси источника и приемника направлены перпендикулярно слою, а поле зрения приемника составляет 1 рад.

В вычислительных экспериментах, результаты которых представлены на рис. 1–3, для простоты предполагалось, что энергия лазерного импульса

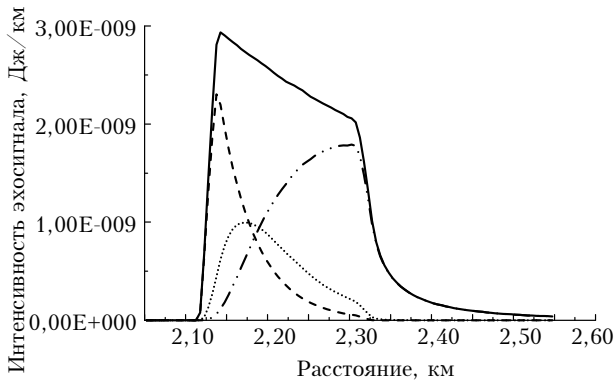


Рис. 3. Результаты статистического моделирования эхосигнала наземного бицифического лидара при зондировании облачного слоя высотой 100 м

равномерно распределена по конусу направлений источника излучения и по длине импульса. Энергия лазерного импульса условно считалась равной 1 Дж. Площадь под графиками интенсивности эхосигналов на рис. 1–3 равна энергии, которая регистрируется приемником лидара за все время наблюдения. В частности, для эхосигнала на рис. 1, а энергия, зарегистрированная приемником, равна $1,269 \cdot 10^{-9}$ Дж, а для эхосигнала на рис. 1, б — $1,513 \cdot 10^{-9}$ Дж.

2. Моделирование пространственных распределений фотонов при рассеянии лазерных импульсов в облачности

Приемники современных лидаров позволяют не только регистрировать эхосигналы в зависимости от времени, но и получать пространственно-временные изображения яркости излучения, рассеянного участком зондируемой области. Для лидаров с такими приемниками используют термин «широкоугольный CCD-лидар». Примерами широкоугольных CCD-лидаров являются WAIL и THOR (см. [13–17]). Поле зрения приемной оптической системы лидара WAIL, например, составляет 88° [17]. Одним из эффектов, наблюдаемых при зондировании облачности CCD-лидаром, является расширяющееся световое кольцо с центром в точке, где лазерный импульс попадает в облачный слой (см. [14, 16]). Методом Монте-Карло этот эффект исследовался в работе [18], где было показано, что при зондировании облачного слоя с оптической толщиной меньше четырех коротким лазерным импульсом в видимом диапазоне длин волн приемник моноцифического широкоугольного CCD-лидара регистрирует расширяющееся световое кольцо. Световое кольцо возникает за счет излучения с высокой кратностью рассеяния. Яркость кольца существенно падает со временем, а угловая скорость распространения слегка уменьшается. Если изменять угловую скорость расширения кольца по наиболее ярким участкам, то она меньше для оптиче-

более толстых облачных слоев. Кроме того, при увеличении оптической толщины само кольцо становится более размытым, и для значений оптической толщины более четырех вместо кольца приемник CCD-лидара регистрирует расширяющийся со временем световой диск с затухающей яркостью.

Наряду с пространственно-временным эхосигналом широкоугольного CCD-лидара метод Монте-Карло позволяет моделировать трехмерные пространственные распределения фотонов лазерного импульса, рассеянного в облачном слое, в зависимости от времени. Начальный импульс, который можно условно представить как сегмент некоторой длины, преобразуется в «облако фотонов», форма которого трансформируется. Результаты статистического моделирования показали, что в достаточности тонких облачных слоях участки пространства с наибольшей концентрацией рассеянных фотонов действительно образуют расширяющийся со временем «бублик» (в геометрии для таких трехмерных объектов с поверхностью в виде тора используют термин «полноторие»). На рис. 4 показаны распределения концентрации рассеянных фотонов лазерного импульса в облачном слое высотой 100 м через 625, 875, 1125, 1375 и 1625 нс после проникновения лазерного импульса в слой (каждое изображение отражает распределение, осредненное по временному интервалу 125 нс).

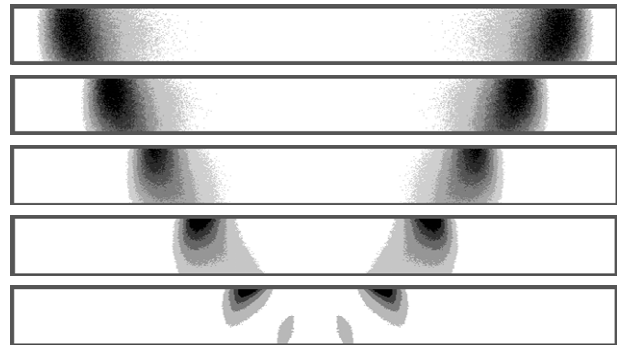


Рис. 4. Плотности распределения фотонов лазерного импульса, рассеянного в облачном слое высотой 100 м через 625, 875, 1125, 1375 и 1625 нс после проникновения лазерного импульса в слой через нижнюю границу. Горизонтальная протяженность участка облачности — 1000 м. Показан вертикальный разрез осесимметричного трехмерного распределения, меняющегося со временем. Увеличение времени соответствует последовательности изображений снизу вверх

В этом вычислительном эксперименте предполагалось, что узкий лазерный импульс длиной 10 м направлен вертикально вверх перпендикулярно однородному плоскому облачному слою с коэффициентом ослабления $0,02 \text{ м}^{-1}$, единичным альбедо однократного рассеяния и индикатрисой рассеяния, соответствующей оптической модели облака «OPAC Stratus maritime» [19] для длины волны 530 нм (такие же параметры использовались при моделировании эхосигнала в работе [18]). На рис. 4 показаны

вертикальные срезы осесимметричных распределений в трехмерном пространстве, соответствующие горизонтальному участку облачности протяженностью 1000 м. Распределения фотонов симметричны относительно середины участка, где расположена ось распространения лазерного импульса. Темные области соответствуют более высокой объемной концентрации фотонов. Видно, что с определенного момента времени участки с максимальной концентрацией фотонов образуют в облачном слое фигуру, напоминающую заполненный тор, расширяющийся со временем.

На рис. 5 представлено распределение фотонов лазерного импульса в облачном слое высотой 800 м через 2500 нс после проникновения лазерного импульса в слой.

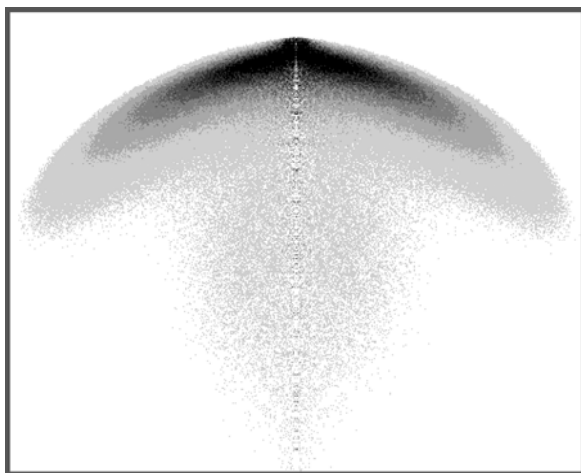


Рис. 5. Плотность распределения фотонов лазерного импульса, рассеянного в облачном слое высотой 800 м

Так же, как и на рис. 4, здесь представлен участок горизонтальной протяженностью 1000 м, а моделирование проводилось для тех же характеристик облачной среды и лазерного импульса. Форма рассеянного импульса в этом случае напоминает купол.

Заключение

Разработано программное обеспечение, которое позволяет моделировать эхосигналы для различных типов наземных и космических лидаров на основе методов Монте-Карло и анализировать особенности распространения лазерных импульсов в облачной атмосфере с учетом влияния кратности рассеяния излучения. С помощью численного моделирования показано, что именно многократное рассеяние лазерного импульса приводит к увеличению контрастности временного эхосигнала, которое при определенных условиях позволяет лучше детектировать дальнюю границу облачности. Продемонстрировано, что расширяющиеся световые кольца, регистрируемые широкоугольными CCD-лидарами при зондировании достаточно тонких облачных слоев, соответствуют особенностям распространения «фо-

тонного облака», порожденного лазерным импульсом. В тонких облачных слоях распределения рассеянных фотонов концентрируются в расширяющихся со временем полноториях, а в более толстых слоях приобретают форму купола.

Автор выражает благодарность член-корреспонденту РАН Г.А. Михайлову, профессору Б.А. Кругину и профессору С.А. Ухинову за полезные обсуждения. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 15-01-00783, 16-01-00145), программы фундаментальных исследований Президиума РАН I.33П и государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации (грант Президента Российской Федерации НШ-5111.2014.1).

ПРИЛОЖЕНИЕ

Краткое описание программы статистического моделирования лидарного эхосигнала LIDAR-1

Программа предназначена для вычисления зависимости лидарного эхосигнала от времени. Предполагается, что однородная рассеивающая среда образует горизонтальный плоский слой. (Специальные значения входных параметров предусматривают возможность расчетов для рассеивающей среды, сосредоточенной в цилиндре заданного радиуса, на оси которого расположен источник излучения.) Плоский слой характеризуется положением верхней и нижней границы облачности, коэффициентом ослабления, альбедо однократного рассеяния и индикатрисой рассеяния, которая задается таблично в отдельном файле. При моделировании используется предположение, что источник излучения находится в точке с нулевыми координатами. Задается направление оси источника, угол расходимости излучения и длина излучаемого импульса. (В представленной версии программы предполагается, что энергия лазерного импульса равна единице, и она равномерно распределена по конусу направлений источника и по длине импульса.) Для приемника задаются его координаты, направление оси, поле зрения и радиус (считается, что приемник представляет собой круг, расположенный перпендикулярно оси). Кроме того, задаются интервал времени, на котором будет фиксироваться эхосигнал, размерность гистограммы эхосигнала и число моделируемых траекторий фотонов. Для описания эхосигнала используются две шкалы: временная и шкала, связанная с расстоянием, которое свет проходит за единицу времени. Вторая шкала служит для более наглядной интерпретации эхосигнала и отображения границ облачности. Кроме самого эхосигнала вычисляются его компоненты, соответствующие разным кратностям рассеяния излучения (максимальная кратность излучения, для которой выводятся результаты, задается во входных параметрах). Для вычисления эхосигнала и его компонент методом Монте-Карло используется простая локальная оценка [11]. Специальный входной параметр слу-

жит для того, чтобы обеспечить конечность дисперсии локальной оценки в случае, когда приемник находится внутри слоя с рассеивающей средой. В ходе счета регулярно создаются временные файлы, которые позволяют продолжить вычисления без потери статистики в случае непредвиденной или запланированной остановки программы. Информация, отображаемая во вспомогательном графическом окне, позволяет анализировать ход вычислений. Для моделирования траекторий фотонов в программе дополнительно реализован специальный прием, который можно назвать расслоением по первому столкновению: плоский слой условно разбивается на k подслоев одинаковой высоты, и (вместо одной траектории) на одинаковых последовательностях случайных чисел моделируются k траекторий с первыми столкновениями, расположенными в этих подслоях. Такой прием улучшает сходимость оценки эхосигнала в случае коротких лазерных импульсов, однако существенного выигрыша при использовании данного способа моделирования замечено не было. Исполняемый файл программы для MS Windows с примерами моделирования и кратким описанием представлен на веб-странице автора <http://osmf.sssc.ru/~smp>. Результаты вычислений с использованием этой программы публиковались, в частности, в диссертации [20].

1. Bissonnette L.R., Bruscaioni P., Ismaelli A., Zaccanti G., Cohen A., Benayahu Y., Kleiman M., Egert S., Flesia C., Schwendimann P., Starkov A., Noorhamadian M., Oppel U.G., Zege E.P., Katsev I.L., Polonsky I.N. Lidar Multiple Scattering from Clouds // Appl. Phys. B. 1995. V. 60, N 4. P. 355–362.
2. Bruscaioni P., Ismaelli A., Zaccanti G. Monte-Carlo calculations of LIDAR returns: procedure and results // Appl. Phys. B: Lasers Opt. 1995. V. 60, N 4. P. 325–329.
3. Bruscaioni P., Flesia C., Ismaelli A., Sansoni P. Multiple scattering and lidar returns // Pure Appl. Opt: J. European Opt. Soc. A. 1998. V. 7, N 6. P. 1273–1287.
4. Klett J.D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns // Appl. Opt. 1981. V. 20, N 2. P. 211–220.
5. Kunkel K.E., Weinman J.A. Monte Carlo analysis of multiply scattered lidar returns // J. Atmos. Sci. 1976. V. 33, N 9. P. 1772–1781.
6. Lu X., Jiang Yu., Zhang X., Lu X., He Y. An algorithm to retrieve aerosol properties from analysis of multiple scattering influences on both ground-based and space-borne lidar returns // Opt. Express. V. 17, iss. 11. P. 8719–8728.
7. Oppel U.G., Wengenmayer M., Prigarin S.M. Monte Carlo simulations of polarized CCD lidar returns // J. Atmos. Ocean. Opt. 2007. V. 20, N 12. P. 1086–1091.
8. Platt C.M.R. Remote Sounding of High Clouds. III: Monte Carlo Calculations of Multiple-Scattered Lidar Returns // J. Atmos. Sci. 1981. V. 38, N 1. P. 156–167.
9. Samokhvalov I.V. Double scattering approximation of lidar equation for inhomogeneous atmosphere // Opt. Lett. 1979. V. 4, N 5. P. 12–14.
10. Winker D.M., Poole L.R. Monte-Carlo calculations of cloud returns for ground-based and spacebased LIDARS // Appl. Phys. B: Lasers Opt. 1995. V. 60, N 4. P. 341–344.
11. Марчук Г.И., Михайлов Г.А., Назаралиев М.А., Дарбинян Р.А., Каргин Б.А., Еленов Б.С. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука, 1976. 280 с.
12. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 303 с.
13. Davis A.B., Cahalan R.F., Spinhirne J.D., McGill M.J., Love S.P. Off-beam lidar: an emerging technique in cloud remote sensing based on radiative Green-function theory in the diffusion domain // Phys. Chem. Earth (B). 1999. V. 24. P. 177–185.
14. Love S.P., Davis A.B., Rohde C.A., Tellier L., Ho C. Active probing of cloud multiple scattering, optical depth, vertical thickness, and liquid water content using Wide-Angle Imaging Lidar // Proc. SPIE. 2002. V. 4815. P. 129–138.
15. Cahalan R.F., McGill M., Kolasinski J., Varnai T., Yetzer K. THOR-Cloud thickness from offbeam lidar returns // J. Atmos. Ocean. Technol. 2005. V. 22, N 6. P. 605–627.
16. Polonsky I.N., Love S.P., Davis A.B. The Wide-Angle Imaging Lidar (WAIL) deployment at the ARM Southern Great Plains site: Intercomparison of cloud property retrievals // J. Atmos. Ocean. Technol. 2005. V. 22, N 6. P. 628–648.
17. Davis A.B. Multiple-scattering lidar from both sides of the clouds: addressing internal structure // J. Geophys. Res. D. 2008. V. 113, iss. 14. DOI: 10.1029/2007JD009666.
18. Prigarin S.M., Aleshina T.V. Monte Carlo simulation of ring-shaped returns for CCD LIDAR systems // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2015. V. 30, N 4. P. 251–257.
19. Hess M., Koepke P., Schult I. Optical properties of aerosols and clouds: the software package OPAC // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1998. V. 79, N 5. P. 831–844.
20. Park J.H. Multiple scattering measurements using multistatic lidar. Thesis (Ph.D.). The Pennsylvania State University, 2008. 188 p.

S.M. Prigarin. Monte Carlo simulation of the effects caused by multiple scattering of ground-based and spaceborne lidar pulses in clouds.

This paper deals with studying specific features of the laser pulse propagation and lidar return signals in remote sensing of clouds by ground-based and spaceborne lidars using Monte Carlo simulation. In particular, the paper describes the effect of "return signal sharpening" that makes a distant cloud boundary more visible. Moreover, the paper presents the results of stochastic simulation of the expanding solid torus of light that can be generated by a laser pulse in a cloud layer. A brief description of the software created by the author to simulate the lidar return signals is enclosed.