

Брюханова Валентина Владимировна

**ЛИДАРНЫЙ СИГНАЛ В ПРИБЛИЖЕНИИ ДВУКРАТНОГО РАССЕЯНИЯ
ОТ УДАЛЕННЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ**

специальность 01.04.05 – Оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико–математических наук

Томск 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Научный руководитель: профессор И.В. Самохвалов

Официальные оппоненты: профессор А.В. Ельников (СурГУ)
(или д.ф.-м. н. В.Н. Маричев ИОА СО РАН)
возможно, профессор А.А. Черемисин (Красноярск СФУ)

Ведущая организация: МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Защита состоится на заседании диссертационного совета

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке

Афтореферат разослан

Ученый секретарь диссертационного совета

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В последние годы глобальные природно–климатические изменения достигли масштабов, угрожающих развитию цивилизации. Актуальность этой проблемы обсуждалась, в частности, на Всемирной конференции по изменению климата (Москва, 2003 г.), в решении которой подчеркнута необходимость развития систематического междисциплинарного инструментального мониторинга климатических и экосистемных изменений. В интересах оперативного контроля состояния окружающей среды развиваются новые дистанционные технологии, основанные на методах лазерного зондирования. Суть этих методов заключается в посылке лазерного излучения, регистрации приемной системой провзаимодействовавшего со средой излучения и последующем анализе, основанном на сравнении характеристик посылаемого и принимаемого излучения. Прибор, реализующий эту идею, назван лидаром.

Однако, несмотря на полувековую историю использования лидаров для диагностики атмосферного аэрозоля, включая частицы облаков и осадков, до сих пор не решены многие технические и методические вопросы лазерного зондирования. К числу направлений, все еще нуждающихся в существенной проработке, относится и лазерное зондирование оптически плотных аэрозольных образований, таких как облака, туманы, плотные дымки и т.п. Это объясняется тем, что лидарный сигнал от таких образований обусловлен не только однократным, но и многократным рассеянием, которое существенно влияет как на величину интенсивности, так и на состояние поляризации принимаемого излучения.

Методология лазерного зондирования оптически плотных рассеивающих сред (естественных облаков) с учетом поляризации и многократного рассеяния развивается в ведущих научных центрах США, Канады, Японии, Италии, Германии, России, Республики Беларусь. Деятельность ряда групп, работающих в этой области, координируется Международной рабочей группой MUSCLE (**M**ultiple **S**cattering in **L**idar **E**xperiments).

Все это подчеркивает актуальность темы диссертационной работы, т.к. она направлена на повышение информативности лидарных систем, разрабатываемых для контроля состояния атмосферного воздуха, исследования микрофизических

свойств облаков, туманов и гидрозоля в приповерхностном слое воды в морях и океанах на основе учёта в лидарном сигнале рассеянного назад излучения первой и второй кратностей.

Исследование закономерностей формирования лидарного сигнала путем численного решения УПИ методом Монте-Карло [1] показывает, что во многих практически важных случаях лидарный сигнал с достаточной точностью можно описать в приближении двукратного рассеяния. Основы теории двукратного рассеяния для описания лидарного сигнала разработаны Б.В. Каулем и И.В. Самохваловым достаточно давно [2–4]. Однако, до сих пор имеется много вопросов, связанных с практическим применением теории для решения задач оперативного контроля состояния атмосферы.

Целью данной работы являются разработка и исследование модели лидарного сигнала в приближении двукратного рассеяния от удаленных оптически плотных аэрозольных образований и оценка ее применимости для интерпретации данных лазерного зондирования естественных облаков и туманов, а также аэрозолей антропогенного происхождения.

Реализация этой цели включала в себя решение следующих **задач**:

1. получение и исследование аналитического выражения лидарного сигнала в приближении двукратного рассеяния от удаленных облачных образований различной стратификации;
2. программная реализация расчета мощности лидарного сигнала в приближении двукратного рассеяния от капельных облаков;
3. программная реализация расчета степени поляризации лидарного сигнала в приближении двукратного рассеяния от капельных облаков и кристаллических облаков;
4. исследование влияния оптических и микрофизических характеристик облачной среды и параметров лидара на величину уровня двукратного рассеяния в лидарном сигнале, на параметры распределения интенсивности в плоскости регистрации лидарного сигнала и на состояние поляризации лидарного сигнала двукратного рассеяния.

Для решения поставленных задач использовались основные положения теории Ми и оптики дисперсных сред, вектор–параметрический формализм Стокса, методы математического моделирования. В качестве **метода исследования** были выбраны численное моделирование и натурный эксперимент.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Полуширина распределения нормированной на максимальное значение интенсивности двукратного рассеяния в плоскости регистрации лидарного сигнала определяется микроструктурой облака и для моделей облаков С1, С2, С3 (по Дейрменджану) варьирует в пределах 4% при изменении глубины проникновения зондирующего импульса в облако, если оптическая толща не превышает 3.
2. Уровень двукратного рассеяния в лидарном сигнале с глубин зондирования, меньших радиуса поперечного сечения диаграммы направленности приёмной системы лидара на входе в облако, не зависит от угла поля зрения приемной системы лидара и определяется только глубиной зондирования облака и его микроструктурой. При значениях глубины зондирования, больших радиуса поперечного сечения диаграммы направленности приёмной системы лидара на входе в однородное удаленное облако, уровень двукратного рассеяния в лидарном сигнале определяется еще и углом поля зрения приемной системы лидара и расстоянием от лидара до облака.
3. Степень поляризации лидарного сигнала в приближении двукратного рассеяния от тропосферных облаков, состоящих из монодисперсных хаотически ориентированных гексагональных столбиков и пластинок, не меняется при варьировании глубины зондирования, дальности облака и угла поля зрения приемной системы лидара; в то время как от капельных полидисперсных облаков она убывает с глубиной зондирования.

Достоверность результатов и выводов работы обеспечивается их непротиворечивостью с фундаментальными положениями теории рассеяния света дисперсными средами, физической обоснованностью используемых моделей и строгостью математических методов, согласованностью с результатами других авторов, а также качественным согласием с данными натурных экспериментов.

Научная новизна результатов работы. Установлено, что вклад траекторий «вперед–назад» и «назад–назад» в лидарный сигнал двукратного рассеяния одинаков. Это позволило получить аналитические выражения для описания лидарного сигнала двукратного рассеяния от удаленного аэрозольного образования в более простом виде.

Предложена трехпараметрическая модель индикатрисы рассеяния, которая может быть использована для оценки размеров частиц капельных облаков из экспериментальных данных, полученных лидаром многократного рассеяния.

Впервые получено аналитическое выражение для описания временной задержки лидарного сигнала от облачного слоя вследствие многократного рассеяния. Показано, что величина лидарного сигнала двукратного рассеяния от облачного слоя определяется нижней границей, мощностью и микроструктурой облачного слоя и углом поля зрения приемной системы лидара.

Получено выражение, связывающее степень поляризации лидарного сигнала в приближении двукратного рассеяния с углом поля зрения приемной системы лидара, дальностью, глубиной зондирования и элементами матрицы рассеяния света зондируемого облака. Анализ зависимости степени поляризации лидарного сигнала двукратного рассеяния от глубины проникновения импульса в облако на основе полученного выражения при варьировании угла поля зрения приемной системы лидара позволяет определить фазовый состав зондируемой среды.

Научная ценность. Проведенные исследования позволяют выявить особенности формирования лидарного сигнала двукратного рассеяния от удаленных плотных аэрозольных образований, а также оценить влияние геометрической схемы эксперимента, параметров лидара и оптических характеристик среды на мощность, состояние поляризации и распределение интенсивности лидарного сигнала в плоскости регистрации.

Приближение двукратного рассеяния позволяет оценить временное "запаздывание" лидарного отклика от облачного слоя малой толщины в зависимости от дальности и микроструктуры облака и определить фазовый состав облака по характеру изменения степени поляризации.

Практическая значимость работы. Использование полученных выражений позволяет повысить точность оценок характеристик помехи обратного рассеяния для оптических локационных систем, работающих в плотных рассеивающих средах, а также оценить предельную пропускную способность канала связи в оптическом диапазоне, использующего в качестве ретранслятора естественное или искусственно созданное облако. Совокупность результатов работы составляет методическую основу разработки лидаров многократного рассеяния.

Использование результатов работы и их внедрение. Результаты работы были использованы при выполнении:

- грантов РФФИ №01–05–65209, 02–05–06343 (МАС), 04–05–64495 (2001–2006г.г.), 08–05–90006–Бел_а (2008–2009), 08–05–13544–офи_ц (2008–2009), №11–05–01200а (2011–2013);
- программы Министерства промышленности, науки и технологий "Содержание уникальных стендов и установок России" (проект "Высотный поляризационный лидар для зондирования атмосферы", рег. № 06–21);
- Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно–технологического комплекса России на 2007–2013 годы» по теме «Проведение исследований в области рационального природопользования с использованием уникальных установок (мероприятие 1.8 Программы) – госконтракты: №02.518.11.7075 от 11 апреля 2007 г.; №02.518.11.7156 от «08» июня 2009 г.; №16.518.11.7048 от 12 мая 2011 г.; №14.518.11.7053 от 20 июля 2012 г.;
- аналитической ведомственной целевой программы “Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2011 годы)”, проекты №2.1.1/6939 и 2.1.1/13333 «Лазерный мониторинг несферических микрочастиц в тропосфере и нижней стратосфере и исследование механизмов ориентации кристаллов в перистых облаках»;
- Федеральной целевой программы «Научные и научно–педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы «Комплексные исследования климатообразующих факторов и процессов в нейтральной атмосфере и

ионосфере оптическими и радиофизическими методами», соглашение №14.В37.21.0612 от 16.08.2012 г.

Методика численного расчета энергетических и поляризационных характеристик лидарного сигнала двукратного рассеяния от облаков используется в учебном процессе на радиофизическом факультете.

Апробация результатов. Результаты исследований по теме диссертации докладывались на Байкальской школе по фундаментальной физике "Взаимодействие излучений и полей с веществом" (Иркутск, 1999 г.); Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Современные техника и технологии" (Томск, 2000 г.); Сибирском конгрессе по прикладной и индустриальной математике "ИНПРИМ–2000" (Новосибирск, 2000 г.); научной конференции "Фундаментальные проблемы охраны окружающей среды и экологии природно-территориальных комплексов западной Сибири" (Горно–Алтайск, 2000 г.); International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory "MMET–2000" (Kharkov, Ukraine, 2000); the 5-th Russian-Chinese Symposium on Laser Physics and Laser Technology (Tomsk, 2000); Международной конференции "Измерения, моделирование и информационные системы как средства реабилитации окружающей среды на городском и региональном уровне (ENVIROMIS)" (Томск, 2000 г.); Международной конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (Новосибирск, 2000 г.); Сибирском совещании по климато-экологическому мониторингу (Томск, 2001 г.); Всероссийской научной конференции "Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими средствами" (Муром, 2001 г.); "Современные проблемы физики и высокие технологии" (Томск, 2003 г.); рабочих группах "Аэрозоли Сибири" (Томск, 2000–2006, 2008 г.г.); Международных школах молодых ученых и специалистов "Физика окружающей среды" (Томск, 2000–2004 г.г.); Международных симпозиумах "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы" (Томск, 2000–2006, 2009, 2011 г.г.); конференции "Оптика и образование" (Санкт–Петербург, 2004 г.); Международных симпозиумах "Контроль и реабилитация окружающей среды" (Томск, 2000, 2002, 2004, 2006, 2008, 2010 г.г.); Всероссийской научной конференции "Распространение радиоволн" (2008 г.);

Международная научно-техническая конференция «Поляризационная оптика» (Москва, 2008 г.); Международной научно–практической конференции «Актуальные проблемы радиофизики» (Томск, 2008, 2010, 2012, 2013 г.г.); Всероссийской научной конференция "Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред" (Муром, 2009, 2012 г.); Международной конференции «Лазерно–информационные технологии в медицине, биологии и геоэкологии» (Новороссийск, 2009, 2011, 2012 г.г.); VI Международная конференции «Солнечно–земные связи и физика предвестников землетрясений» (Паратунка, 2013).

Публикации. Содержание диссертации отражено в 71 работе, включая 19 статей в отечественных и зарубежных изданиях, из которых 14 в рецензируемых журналах из перечня ВАК. Получено 2 патента РФ на полезную модель.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы из 229 наименований. Общий объём работы – 155 страниц, в том числе, 44 рисунка, 4 таблицы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации; сформулированы цель и основные задачи исследования; приведены защищаемые положения, новизна полученных результатов, практическая значимость и сведения об апробации работы; представлен краткий обзор структуры диссертации.

В первой главе диссертации рассматриваются методы описания лидарного сигнала от аэрозольных образований и модели оптических характеристик аэрозольных сред. Приведен обзор методов описания лидарного сигнала с учетом многократного рассеяния: метод статистических описаний (метод Монте–Карло), метод малоуглового приближения, приближение двукратного рассеяния.

Во второй главе исследуется общее выражение для мощности лидарного сигнала двукратного рассеяния, полученного Каулем Б.В. и Самохваловым И.В. [4]. Анализ его показывает невозможность численного определения подынтегрального выражения при значении угла рассеяния $\gamma=\pi$. Поэтому для численного интегрирования был выбран метод Гаусса, позволяющий минимизировать ошибку

вычисления путем специального выбора узлов интегрирования, несовпадающих с сеткой интегрирования.

Верификация предложенного способа расчета мощности и степени поляризации лидарного сигнала двукратного рассеяния осуществлялась численной проверкой выполнения условия нормировки облачных индикатрис рассеяния $C1$, $C2$, $C3$ [5] и сравнением результатов расчета добавки двукратного рассеяния в лидарный сигнал $\delta = P^{(2)}/P^{(1)}$ с данными [6, 7] (рисунок 1а и 1б, соответственно).

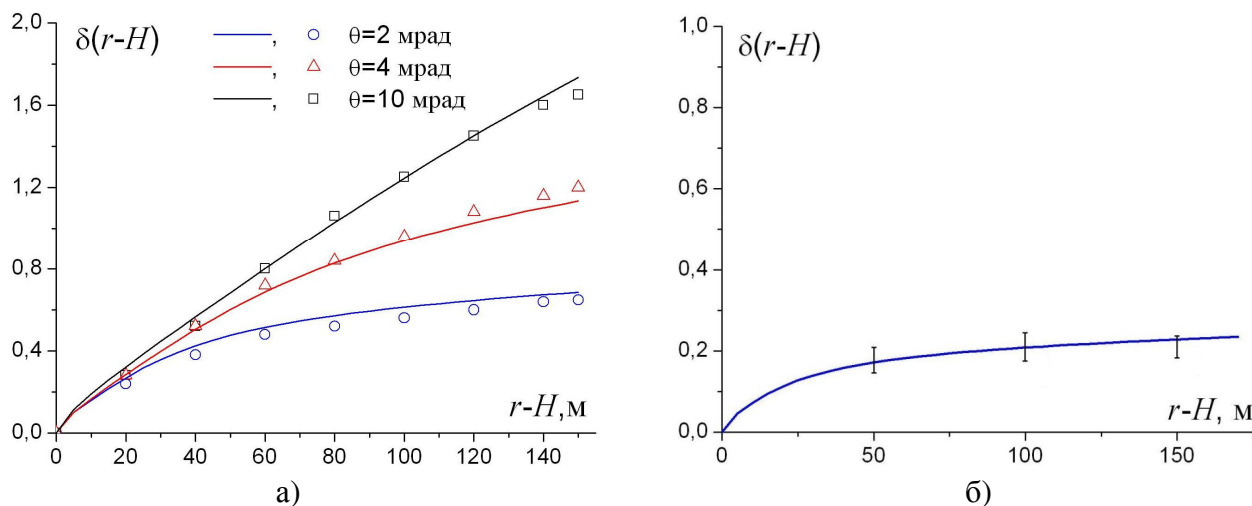


Рисунок 1 – Относительный уровень двукратного рассеяния в лидарном сигнале от облака C1:

а) $\lambda=700$ нм, $\sigma_0=16.7$ км $^{-1}$, $\theta_0=0.002, 0.004, 0.010$; б) $\lambda=1064$ нм, $\sigma_0=17.25$ км $^{-1}$, $\theta_0=0.001$.

Для исследования влияния угла поля зрения приемной системы лидара θ_0 , модального радиуса r_{mod} и полуширины распределения капельного облака на вклад двукратного рассеяния в лидарный сигнал использовались статистически обоснованные модели облаков [8]. Расчет индикатрис рассеяния осуществлялся с помощью программы PolyMie [9]. Результаты расчета $\delta(r-H)$ не противоречат выводам работы [1] и показывают, что уровень многократного рассеяния в лидарном сигнале, при заданной длине волны зондирующего излучения, определяется параметрами микроструктуры, дальностью до облака и углом поля зрения приемной системы лидара.

Полученные выше результаты, создают методическую основу выделения сигнала двукратного рассеяния из отражённого облаком излучения. Поскольку лидарный сигнал однократного рассеяния формируется в узком объеме рассеивающей среды, ограниченном диаграммой направленности передатчика, а

сигнал двукратного рассеяния формируется в объеме, поперечное сечение которого определяется диаграммой направленности приёмной системы - θ_0 , то вклад двукратного рассеяния можно определить, зная зависимость мощности лидарного сигнала от угла θ_0 . Выбор конкретных значений θ_0 , эффективных для выделения сигнала многократного рассеяния из лидарного сигнала, должен осуществляться, исходя из дальности облака и глубины зондирования. Рассмотрим рисунок 2.

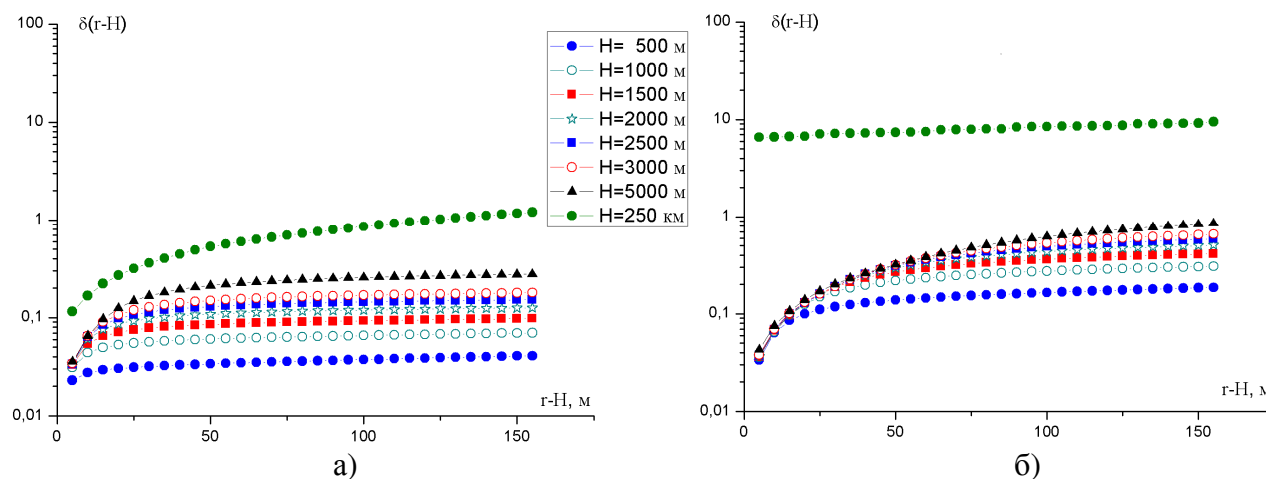


Рисунок 2 – Зависимость $\delta(r-H)$ для различной дальности облака H при двух значениях угла поля зрения приемной системы лидара: а) $\theta_0=0.1$ мрад, б) $\theta_0=0.5$ мрад.

При малых значениях θ_0 на больших глубинах зондирования величина $\delta(r-H)$ от среднекапельного облака ($r_{\text{mod}}=6$ мкм) меняется с увеличением H почти линейно; при больших θ_0 с увеличением дальности облака δ растет несколько медленнее: при θ_0 в 5 раз – с 0.1 мрад до 0.5 мрад δ увеличивается в 2.7–4.5 раза на значимых глубинах зондирования (т.е. с 50 м) для облаков нижнего яруса и в 1.1–3.8 раза для облаков среднего яруса (чем больше H , тем меньше отношение $\delta(0.5)/\delta(0.1)$).

Использование в качестве фотоприемного устройства CCD–камеры позволяет зарегистрировать в любой момент времени не только мощность сигнала обратного рассеяния, но и распределение интенсивности в плоскости регистрации. В диссертации численно исследовано распределение интенсивности, нормированной на максимальное её значение для каждой глубины проникновения зондирующего импульса в облако, двукратного рассеяния в плоскости регистрации (рисунок 3) при разных дальностях H . Буквой i на этих графиках обозначен порядковый номер элементарной кольцевой зоны, в которой регистрируется интенсивность

двукратного рассеяния. Шаг изменения глубины проникновения импульса в облако от 50 до 100 м составлял 10 м, а от 100 до 300 м – 50 м.

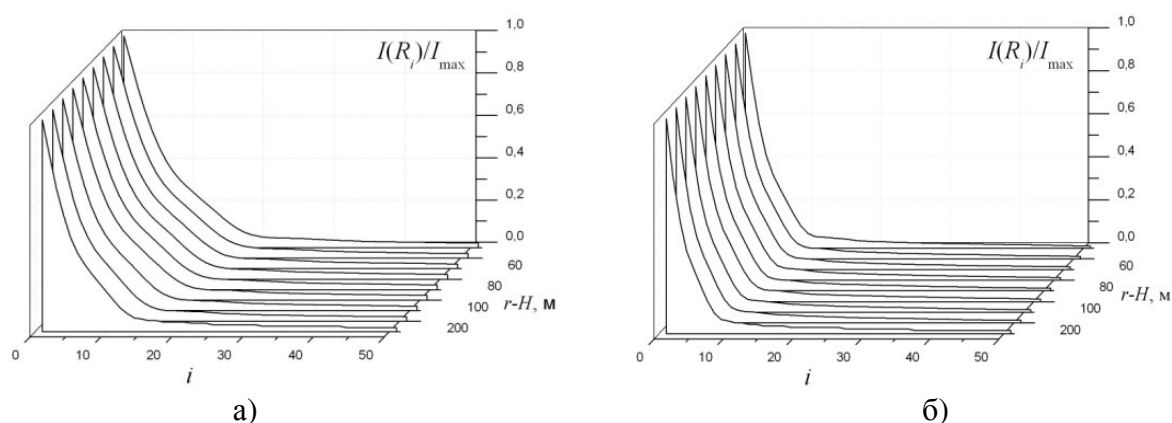


Рисунок 3 – Зависимость нормированной на максимальное значение интенсивности двукратного рассеяния от глубины проникновения зондирующего импульса в облако С1, удаленного от лидара на: а) 500 м; б) 1000 м

Из рисунка видно, что с изменением дальности (500, 1000м) вид распределения не меняется; меняется абсолютное значение интенсивности, а следовательно, и мощность лидарного сигнала двукратного рассеяния. В плоскости регистрации интенсивность двукратного рассеяния от облаков, содержащих крупные частицы, по мере удаления от центра регистрирующей системы уменьшается быстрее по сравнению с облаками, содержащими более мелкие капли (рисунок 4). Данное утверждение согласуется с результатами расчетов других авторов [10, 11].

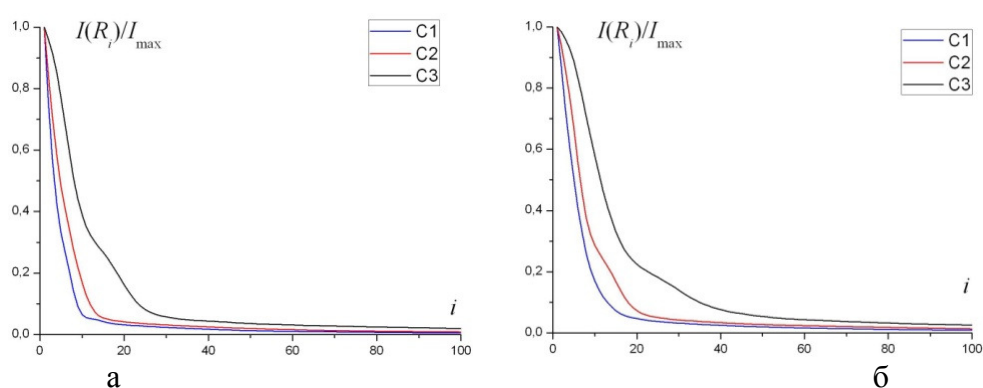


Рисунок 4 – Распределение нормированной интенсивности двукратного рассеяния в плоскости регистрации для моделей облаков С1, С2, С3 при длине волны: а) 450 нм; б) 700 нм

В третьей главе показано, что траектории фотонов претерпевших две кратности рассеяния типа “вперед–назад”, “назад–назад” дают одинаковый вклад в

интенсивность сигнала обратного рассеяния. Это позволяет существенно упростить общее выражение для лидарного сигнала. Рассмотрим рисунок 5.

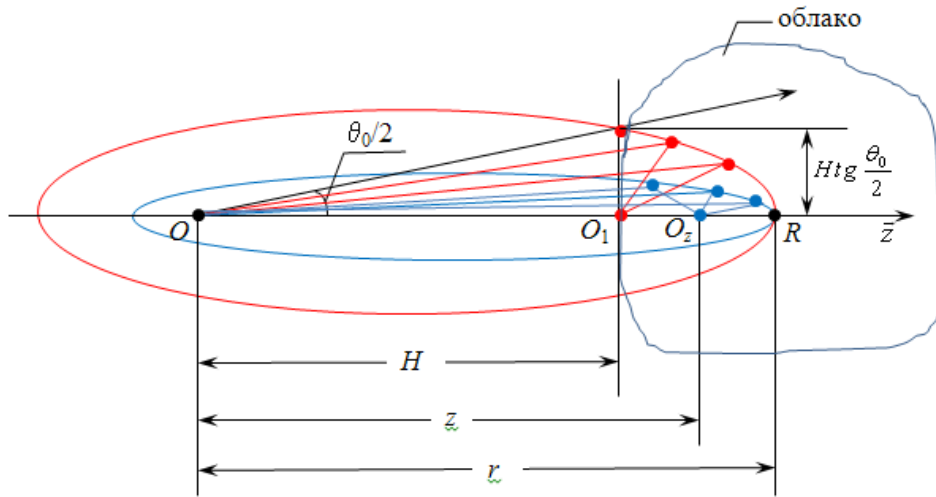


Рисунок 5 – Схема формирования потока двукратно рассеянного назад излучения от облака, когда глубина зондирования не превышает радиуса поперечного сечения диаграммы направленности приёмной системы лидара на входе в облако ($r-H \leq H \tan(\theta_0/2)$)

Совместим передатчик коаксиального лидара с началом отсчета (точка O). Одновременно с фотонами, претерпевшими однократное рассеяние в объёме, находящемся на расстоянии r от лидара (точка R), в приемную систему лидара (в момент времени ($t_r = 2r/c$)) попадут фотоны, претерпевшие двукратное рассеяние: первый акт рассеяния происходит на оси зондирующего пучка в любой точке O_z отрезка O_1R ; второй акт рассеяния происходит в рассеивающем объёме, лежащем на сегменте эллипсоида вращения с фокусами в точках O и O_z и вершиной в точке R , ограниченном нижней границей облака (на рисунке 5 он показан синим цветом). В формировании всего лидарного сигнала двукратного в этот же момент времени t_r примут участие фотоны с центрами первичного рассеяния в точках O_z , лежащих на оптической оси передающей системы на расстояниях $H < z < r$, и центрами вторичного рассеяния, лежащими на поверхностях сегментов эллипсоидов вращения с фокусами в точках O и O_z и вершиной в точке R . Очевидно, что таких эллипсоидов бесконечно много, но все они являются вложенными во внешний, обозначенный красным цветом, эллипсоид с фокусами в точках O и O_1 . Т.е. на малых глубинах зондирования ($r-H \leq H \tan \theta_0/2$) величина $\delta(r-H)$ определяется

глубиной зондирования облака и не зависит от угла поля зрения приемной системы лидара

$$\delta_{21}(r) = \frac{2\sigma_0(r-H)}{\chi(\pi)} \int_0^{\pi/2} \chi(\gamma)\chi(\pi-\gamma)tg\frac{\gamma}{2}d\gamma. \quad (1)$$

При наземном зондировании капельных облаков, как правило, $r > H + Htg\theta_0/2$, и поперечное сечение рассеивающего объема на этих расстояниях ограничивается углом поля зрения приемной системы лидара (рисунок 6, желтая область).

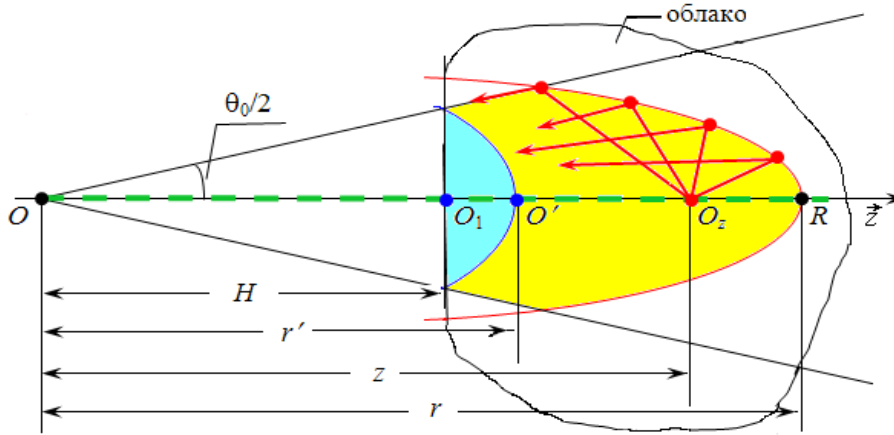


Рисунок 6 – Схема формирования потока двукратного рассеяния при $r - H \geq Htg\frac{\theta_0}{2}$

В этом случае

$$\delta_{21}(r) = \frac{I_1 + I_2}{\chi(\pi)}, \quad (2)$$

где

$$I_1 = \sigma_0(r-H) \int_0^{\gamma_1} \chi(\gamma)\chi(\pi-\gamma)tg\frac{\gamma}{2}d\gamma, \quad I_2 = \frac{\sigma_0 r \theta_0}{2} \int_{\gamma_1}^{\pi/2} \chi(\gamma)\chi(\pi-\gamma)d\gamma,$$

$$\gamma_1 = 2arctg\left(\frac{r}{r-H}tg\frac{\theta_0}{2}\right).$$

Для оценки границ применимости приближённых выражений для лидарного сигнала двукратного рассеяния от удалённого облака были выполнены расчёты $\delta_{21}(r)$ на основе общего выражения [1] (рисунок 7, черные незакрашенные символы) и выражений (1)–(2) (рисунок 7, черные закрашенные символы). Синими символами на рисунке 7 показано относительное различие рассчитанных величин в процентах (правая шкала на рисунках).

Из сравнения кривых на рисунке следует, что с увеличением глубины зондирования относительная погрешность убывает, т.е. точность оценки лидарного

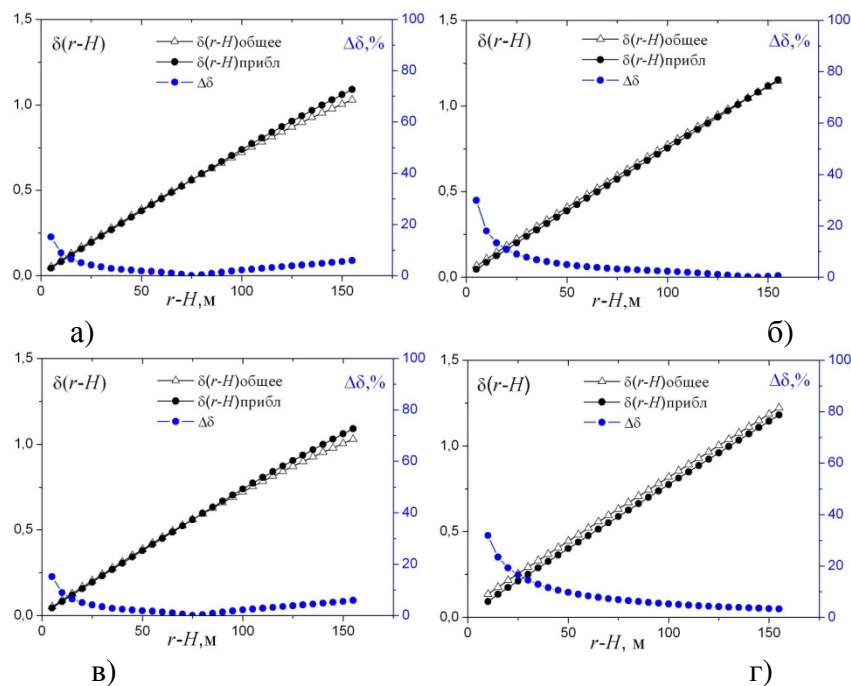


Рисунок 7 – Уровень двукратного рассеяния в лидарном сигнале от однородного облака нижнего яруса ($\mu=2$, $r_{\text{mod}}=6$ мкм) нижнего яруса: а) $H=1$ км, $\theta_0=3$ мрад; б) $H=1$ км, $\theta_0=5$ мрад; в) $H=2$ км, $\theta_0=3$ мрад; г) $H=2$ км, $\theta_0=5$ мрад.

сигнала двукратного рассеяния на основе общего выражения [1] и приближённого (1)–(2) становятся сравнимыми. Аналогичный характер зависимостей получен для облаков среднего и верхнего яруса. При зондировании облаков верхнего яруса, чтобы остаться в рамках приближения двукратного рассеяния, угол поля зрения приемной системы лидара необходимо уменьшить до 1.5 мрад.

Различие значений относительного вклада двукратного рассеяния в лидарный сигнал на значимых глубинах зондирования (не менее 50 м в силу неоднородности нижней границы облака), полученных на основе общего выражения и на основе выражения для удаленного облака, во многих случаях не превышает ошибку оценки лидарного сигнала ($<10\%$). Это позволяет сделать заключение о возможности использования приближённого выражения (2) на практике.

При зондировании облачных слоёв, лазерное излучение сильно ослабляется в оптически плотных средах и, как правило, не достигает верхней границы облака H_2 . Однако, если оптическая толщина облака невелика, зондирующий импульс может выйти за пределы облака (рисунок 8) и в приемную систему лидара будут поступать фотоны, претерпевшие многократное рассеяние в облаке. Происходить это будет с некоторой задержкой относительно фотонов отраженных от верхней границы

облака, т.е. будет происходить так называемая «затяжка» лидарного сигнала. Рассмотрим это явление на примере зондирования резко выраженного слоя, когда рассеяние излучения в слое много больше, чем на трассе до облака и после него. В этом случае можно считать, что $\sigma(z) = 0$ при $0 < z < H_1$ и $z > H_2$; $\sigma(z) = \sigma_0 \neq 0$ при $H_1 < z < H_2$ (рисунок 8).

Из анализа схемы формирования лидарного сигнала облачным слоем следует, что мощность сигнала однократного рассеяния $P^{(1)}(r > H_2) = 0$. Однако, лидарный

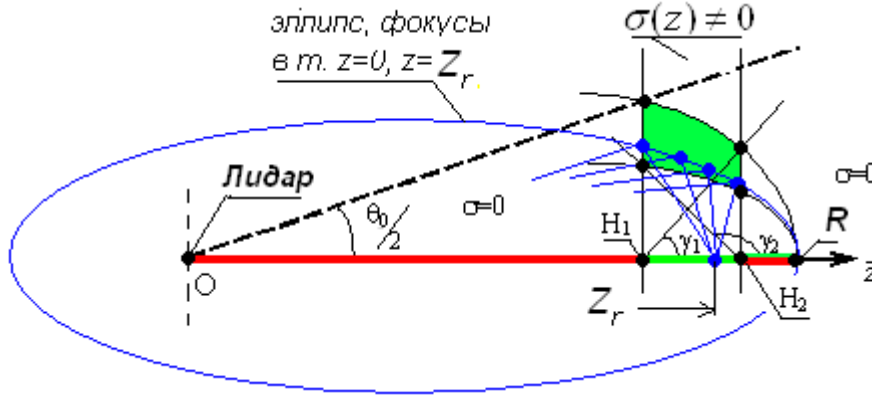


Рисунок 8 – Схема формирования потока двукратного рассеяния облачным слоем

сигнал $P^{(2)}(r)$ при $r > H_2$ отличен от 0. Он формируется фотонами претерпевшими первичное рассеяние на участке трассы $H_1 H_2$ в точках с координатой Z_r и вторичное рассеяние на частицах среды, расположенных на поверхности эллипсоидов вращения с фокусами в точках O и Z_r и имеющих общую вершину в т. R . Мощность сигнала двукратного рассеяния описывается выражением:

$$P^{(2)}(r) = \frac{P_0 A c \tau_u H_1}{4\pi r^2} \operatorname{tg} \frac{\theta_0}{2} e^{-2\tau(r)} \int_{\gamma_1}^{\pi/2} \int_{\xi_2}^{\xi_0} \sigma(\xi) \sigma(\xi_1) \chi(\gamma) \chi(\pi - \gamma) \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} d\xi d\gamma,$$

где

$$\xi_0 = \frac{r - H_1}{H_1 \operatorname{tg} \frac{\theta_0}{2}}, \quad \xi_2 = \frac{r - H_2}{H_1 \operatorname{tg} \frac{\theta_0}{2}}, \quad \gamma_1 = 2 \operatorname{arctg} \sqrt{1 - \frac{H_2 - H_1}{r - H_1}}.$$

Для однородного слоя ($\sigma = \sigma_0 = \text{const}$) при $H_1 \leq z \leq H_2$ справедливо выражение

$$P^{(2)}(r) = \frac{P_0 A c \tau_u \sigma_0 \tau(H_2 - H_1)}{4\pi r^2} e^{-2\tau(H_2 - H_1)} \int_{\gamma_1}^{\pi/2} \chi(\gamma) \chi(\pi - \gamma) \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} d\gamma.$$

где $\tau(H_2 - H_1) = \sigma_0(H_2 - H_1)$ – оптическая толщина облачного слоя.

Таким образом, временная задержка лидарного сигнала определяется второй кратностью рассеяния, а её величина и мощность лидарного сигнала двукратного рассеяния определяется дальностью до облачного слоя H_1 толщиной облачного слоя и индикатрисой рассеяния.

Для получения компактного аналитического выражения связывающего мощность лидарного МР- сигнала с характеристиками среды необходимо иметь также индикатрису рассеяния в аналитическом представлении. В диссертации предложено использовать для индикатрисы рассеяния выражение:

$$\chi(\gamma) = \frac{a}{\mu^2} \exp(-\gamma/\mu) + b.$$

Для определения коэффициентов предложенной аппроксимации использованы граничные условия

$$b = \chi(\pi), \quad \chi(0) = \frac{a}{\mu^2},$$

а для определения параметра μ – условие нормировки. Результаты, полученные с использованием трехпараметрической модели, отличаются от результатов расчета с использованием табличной индикатрисы рассеяния, не более, чем на 10%.

В четвертой главе приведен обзор литературы по микроструктуре кристаллических облаков и по моделям матрицы рассеяния света (МРС) облаков; получены выражения для вектора Стокса и степени поляризации лидарного сигнала в приближении двукратного рассеяния для случая зондирования облаков линейно и циркулярно поляризованным излучением.

Результаты расчета степени деполяризации лидарного сигнала от капельного облака С1 ($\lambda=1064$ нм, $\sigma=20$ км⁻¹), находящегося на расстоянии 1 км от лидара, на основе полученного выражения хорошо согласуются для угла поля зрения 0.5 мрад с результатами расчета минской лидарной группы на основе полуаналитической модели [12] (рисунок 9, символы). При увеличении угла поля зрения приемной системы, растет вклад рассеяния более высоких кратностей, что демонстрируют результаты расчета для $\theta_0=5$ мрад.

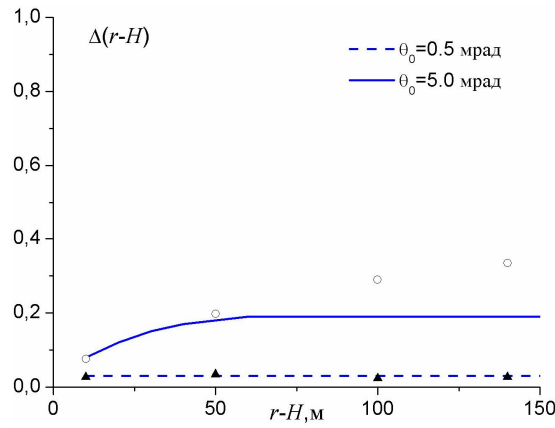
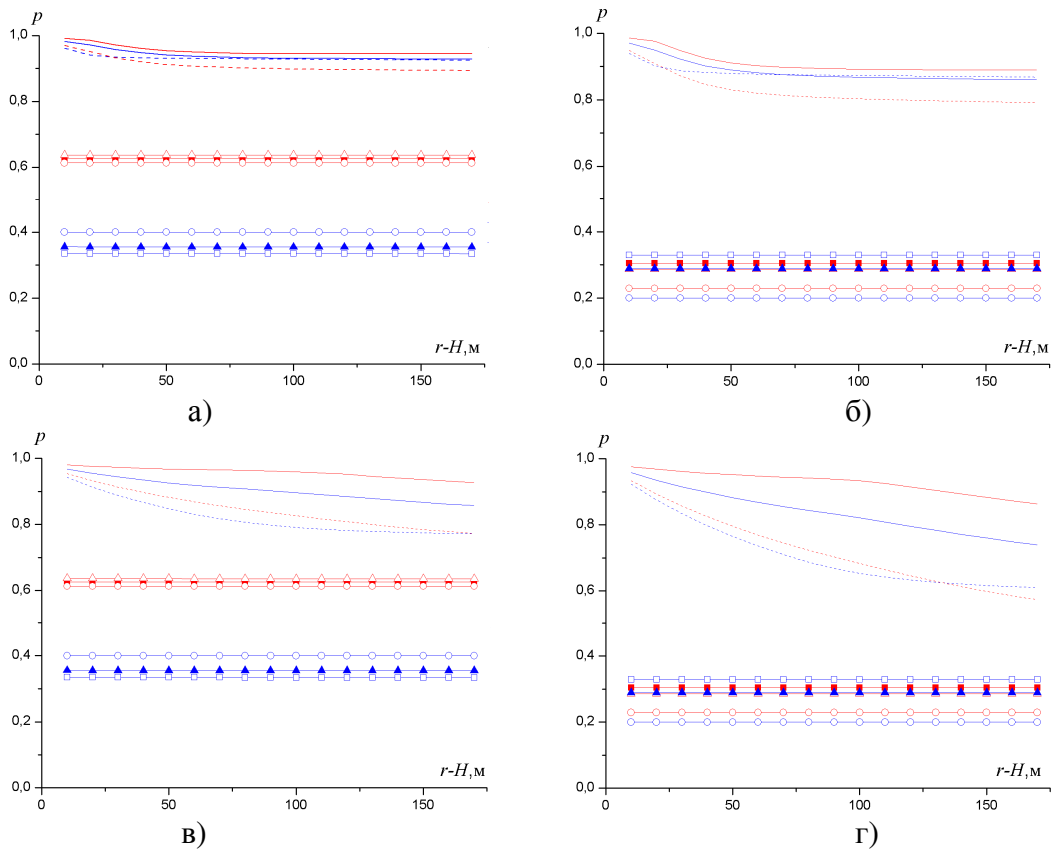


Рисунок 9 – Степень деполаризации лидарного сигнала от облака С1.

Степень поляризации лидарного сигнала в приближении двукратного рассеяния от облака, состоящего из монодисперсных хаотически ориентированных гексагональных кристаллов, практически не меняется с глубиной зондирования и с изменением дальности облака (рисунок 10). При использовании циркулярно поляризованного излучения степень поляризации уменьшается с увеличением высоты кристаллических столбиков и с увеличением ширины кристаллических пластинок.



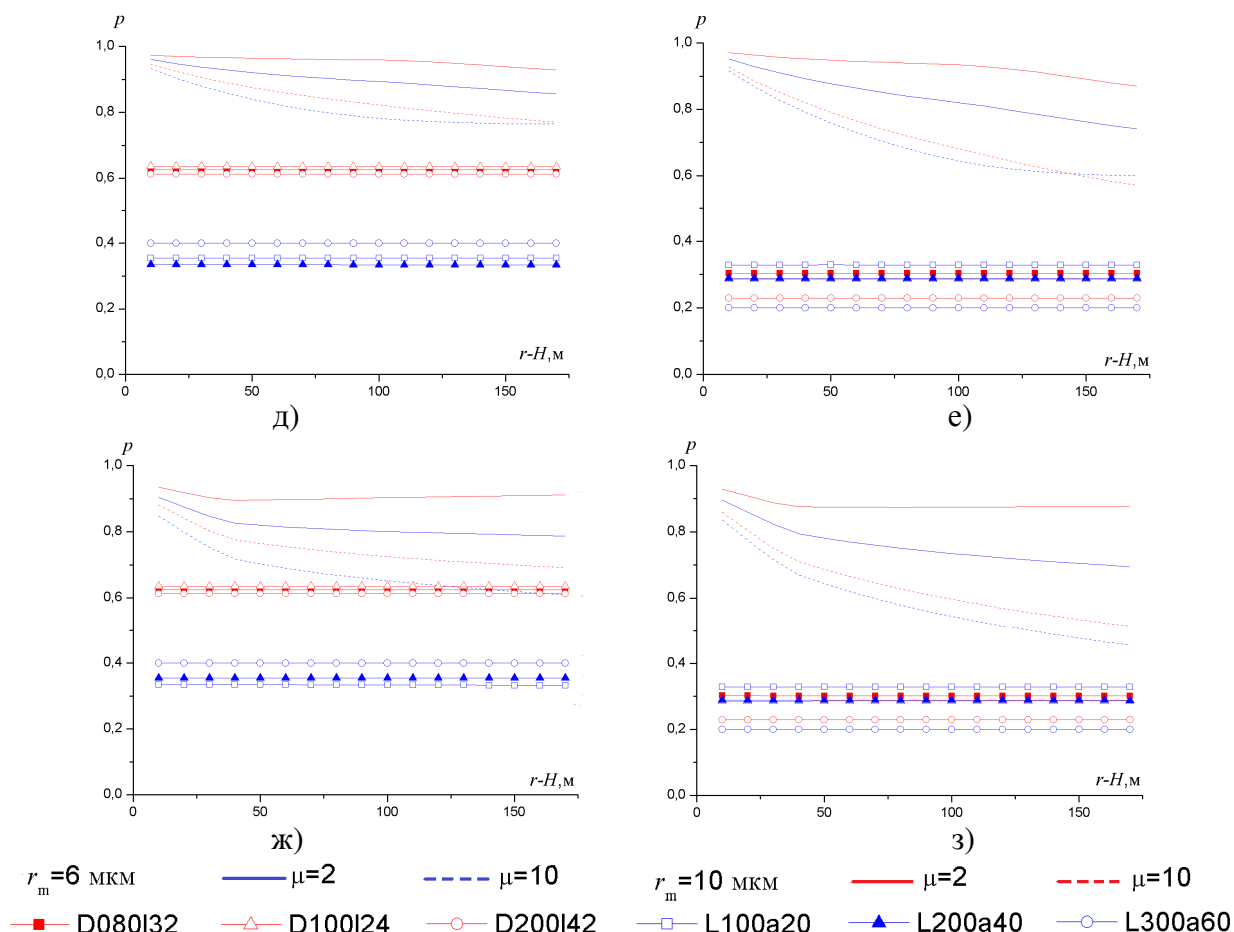


Рисунок 10 – Зависимость степени поляризации лидарного сигнала в приближении двукратного рассеяния от глубины зондирования

При зондировании пластинок изменение зондирующего излучения с линейно на циркулярно поляризованное степень поляризации меняется в 2–3 раза и составляет в первом случае 61–63% и 23–31% во втором; а при зондировании гексагональных столбиков – 34–40% и 20–32%, соответственно. И чем больше горизонтальное сечение кристаллов, тем сильнее выражено это различие.

При зондировании полидисперсных капельных облаков на величину степени поляризации лидарного сигнала в приближении двукратного рассеяния влияют еще и глубина зондирования и дальность облака: чем они больше, тем сильнее деполаризован лидарный сигнал. Степень поляризации лидарного сигнала в приближении двукратного рассеяния от капельных облаков при зондировании циркулярно поляризованным излучением изменяется с глубиной зондирования значительно, чем при зондировании линейно поляризованным излучением.

Отмеченные особенности позволяют сделать вывод о возможности определения фазового состава облака (капли или кристаллы) и ориентации кристаллических частиц (столбики или пластинки) по характеру изменении степени

поляризации лидарного сигнала, обусловленного одно– и двукратным рассеянием, при изменении состояния поляризации лазерного излучения и глубины проникновения зондирующего импульса в облако.

В заключении перечислены наиболее важные результаты, полученные в диссертационной работе.

- В плоскости регистрации лидарного сигнала интенсивность поступающего в приемную систему лидара излучения распределена неравномерно: в центре (на оптической оси приёмного объектива) она принимает максимальное значение, убывая по мере удаления от него. Скорость этого убывания определяется микроструктурой облака: чем больше полуширина и мода распределения частиц по размерам, тем быстрее уменьшается интенсивности лидарного сигнала. С увеличением глубины проникновения зондирующего импульса в облако вид распределения нормированной интенсивности двукратного рассеяния в плоскости регистрации лидарного сигнала практически не меняется; меняется лишь абсолютное значение интенсивности, а следовательно, и мощность лидарного сигнала двукратного рассеяния.
- Получены аналитические выражения для описания мощности лидарного сигнала двукратного рассеяния от удаленных аэрозольных образований в общем виде, а также с учетом стратификации среды (однородная полубесконечная среда, однородное облако, однородный и неоднородный облачный слой).
- При зондировании облаков, если глубина проникновения импульса в облако не превышает радиуса поперечного сечения диаграммы направленности приёмной системы лидара на входе в облако, уровень мощности двукратного рассеяния в лидарном сигнале определяется глубиной зондирования облака и слабо зависит от угла поля зрения приемной системы лидара; при дальнейшем углублении зондирующего импульса в облако величина лидарного сигнала двукратного рассеяния зависит не только от глубины зондирования облака и дальности рассеивающего объема, но и от угла поля зрения приемной системы лидара.
- В приближении двукратного рассеяния получено аналитическое выражение, описывающее форму импульса отражённого оптически прозрачным облачным

слоем, которое объясняет механизм временной задержки заднего фронта импульса и показывающего, что величина этой задержки определяется формой индикатрисы рассеяния и оптической толщиной слоя.

- Сделаны оценки углов поля зрения лидаров различного базирования, которые позволяют либо минимизировать вклад многократного рассеяния в лидарном сигнале от облаков, либо существенно увеличить его для последующей декомпозиции в приближении двукратного рассеяния.
- Получены выражения для описания степени поляризации лидарного сигнала в приближении двукратного рассеяния от капельных и кристаллических облаков при различных состояниях поляризации зондирующего импульса. Показано, что степень поляризации лидарного сигнала двукратного рассеяния чувствительна к микроструктуре аэрозольного образования и состоянию поляризации зондирующего излучения. С глубиной проникновения импульса в облако и увеличением поперечного размера облака степень поляризации лидарного сигнала от капельного облака уменьшается, в то время как от кристаллических облаков она остается неизменной.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Пат. 100636. Российская Федерация, МПК G01S17/88. Устройство регистрации лидарного сигнала / Брюханова В.В., Самохвалов И.В., Симонова Г.В.; заявитель и патентообладатель ГОУВПО Томский государственный университет и Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН. № 2010123565/28; заявл. 09.06.10; опубл. 20.12.10, Бюл. № 35.
2. Пат. 106759. Российская Федерация, МПК G01S17/00. Устройство подавления помехи обратного рассеяния в ближней зоне поляризационного лидара / Самохвалов И.В., Кириллов Н.С., Брюханова В.В., Стыкон А.П.; заявитель и патентообладатель ГОУВПО Томский государственный университет. № 2011105505/28; заявл. 14.02.2011; опубл. 20.07.2011, Бюл. № 35.
3. Брюханова В.В., Самохвалов И.В. Использование степени поляризации лидарного сигнала двукратного рассеяния для определения параметров облаков верхнего яруса. / Методы и устройства передачи и обработки информации. – СПб.: Гидрометеиздат, 2002, с. 4–14.

4. Samokhvalov I.V., Bryukhanova V.V., Doroshkevich A.A., Kaul B.V., Zege E.P., Chaikovskaya L.I., Malinka A.V. Correction for distortions in lidar measurements of cloud backscattering phase matrices caused by multiple scattering. // Russian Physics Journal – 2008 – T.51 – № 9 – P. 958–964.
5. Bryukhanova V.V. Distribution of the doubly scattered lidar signal intensity in the registration plane // Russian Physics Journal – 2011 – T.53 – № 9 – P. 920–926.
6. Брюханова В.В., Самохвалов И.В., Абрамочкин С.А., Абрамочкин А.И., Тихомиров А.А. Лидарный сигнал многократного рассеяния от капельных облаков // Оптика атмосферы и океана – 2003 – Т.16 – №9 – С. 773–782.
7. Пирогов Н.С., Самохвалов И.В., Брюханова В.В. Исследование возможности определения размеров частиц аэрозольных образований лидаром с изменяемым углом поля зрения // Изв. вузов. Физика – 2008 – Т.51 – №9/3 – С. 111–112.
8. Брюханова В.В., Дорошкевич А.А. Влияние микроструктуры однородного облака на степень поляризации лидарного сигнала двукратного рассеяния // Изв. вузов. Физика – 2008 – Т.51 – №9/3 – С. 77–78.
9. Брюханова В.В., Эрдыниева Э.Ж. Лидарный сигнал двукратного рассеяния с использованием аналитической модели индикатрисы рассеяния // Изв. вузов. Физика – 2012 – Т.55 – №9–2 – С.145–147.
10. Брюханова В.В., Дорошкевич А.А., Банзарон С.Б. Влияние микроструктуры облака на величину лидарного сигнала двукратного рассеяния // Изв. вузов. Физика – 2012 – Т.55 – №9–2 – С. 120–121.
11. Брюханова В.В. Модель лидарного сигнала двукратного рассеяния от однородного удаленного облака: оценка границ применимости // Изв. вузов. Физика – 2013 – Т.56 – №8/3 – С. 257–259.
12. Брюханова В.В., Самохвалов И.В., Ни Е.В. Влияние угла поля зрения приемной системы лидара на величину сигнала двукратного рассеяния от капельных облаков // Изв. вузов. Физика – 2013 – Т.56 – №8/3 – С. 260–262.
13. Брюханова В.В., Дорошкевич А.А. Степень поляризации лидарного сигнала двукратного рассеяния от удаленных облаков // Изв. вузов – Физика – 2006 – Т.49 – №9. Приложение 3 – С. 230–232.

14. Брюханова В.В. Определение фазового состава облаков по состоянию поляризации лидарного сигнала двукратного рассеяния // Материалы IV международного симпозиума "Контроль и реабилитация окружающей среды", Томск, 2004. – С. 8–10.
15. Bryukhanova V.V., Samokhvalov I.V. Lidar signal model from remote aerosol formations in double scattering approach // VIII-th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, Kharkov, Ukraine, 2000, Vol.1, p.253–255.
16. Bryukhanova V.V., Samokhvalov I.V. Lidar signal structure from remote aerosol formation considering double scattering // Proceedings of SPIE. 2001, Vol. 4341, [4341–49], p.358–361.
17. Abramotchkin A.I., Abramotchkin S.A., Bryukhanova V.V., Samokhvalov I.V., Tikhomirov A.A. A lidar with changeable field of view for recording multiple scattering // Proceedings of SPIE, 2001, Vol. 4341, p. 273-277.
18. Bryukhanova V.V., Doroshkevich A.A., Pirogov N.S. The lidar signal of double scattering from the removed droplet and crystalline clouds // Proceeding of SPIE, V. 6160, Part 2, 2006, 61602A1–61602A9.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Креков Г.М., Наац И.Э., Самохвалов И.В. и др. Дистанционные методы исследования атмосферы. – Новосибирск: Наука, 1976. – 160 с.
2. Кауль Б.В., Самохвалов И.В. Уравнение лазерной локации атмосферы с учетом двукратного рассеяния. // Изв. вузов, Физика – 1975 – №8 – С. 109–113.
3. Самохвалов И.В. Влияние двукратного рассеяния на поляризационные характеристики эхо-сигналов при лазерном зондировании облаков // Изв. АН СССР, ФАО – 1980 – Т.16 – №6 – С. 591–600.
4. Зуев В.Е., Кауль Б.В., Самохвалов И.В. и др. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей. – Н.: Наука, 1986. – 188 с.
5. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами – М.: Мир, 1971. – 165 с.
6. Eloranta E.W. Practical model for the calculation of multiply scattered lidar returns // Applied Optics –1998 – V.37 – No12 – P. 2464–2472.

7. Bissonnette L.R., Bruscaaglioni P., Ismaelli A., etc. LIDAR multiple scattering from clouds // Applied Physics B –1995 – Vol.60 – P. 355–362.
8. Зуев В.Е. Распространение лазерного излучения в атмосфере. – М.: Радио и связь, 1981. – 288 с.
9. Program PolyMie to calculate optical properties (phase function or matrix, extinction and absorption coefficients) of water droplet clouds // INTAS project 01-0239. [Web–сайт]. Updated: May, 2005. URL: http://osmf.sccc.ru/~smp/INTAS_01-0239/main.html. (дата обращения 17.05.2012)
10. Chaikovskaya L.I., Zege E.P., Katsev I.L. et al. Lidar return from multiply scattering media in multiple–field–of–view and CCD lidars with polarization devices: comparison of semi–analytical solution and Monte–Carlo data // Applied Optics – 2009 – Vol.48 – P. 623–632.
11. Veselovskii I., Korenskii M., Griaznov V. et al. Information content of data measured with a multiple-field-of-view lidar // Applied Optics – 2006 – V.45 – P. 6839–6848.
12. Ivanov A.P. Polarization of light and its use in various problems on optics of scattering media // Optics and spectroscopy – 2009 – V.107 – No.2 – p. 171–183.