

УДК 535.2:621.373.826

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРУ В КОСМОС ПРИ НАЛИЧИИ ОБЛАКОВ ВЕРХНЕГО И СРЕДНЕГО ЯРУСОВ

© 2021 г. В. П. Бусыгин^а, *, А. С. Гинзбург^б, И. Ю. Кузьмина^с, **

^аФГКУ “12 ЦНИИ” Минобороны России, ул. Весенняя, 2Б, Сергиев Посад, Московская область, 141307 Россия

^бИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, Москва, 119017 Россия

^сАО “Научно-производственная корпорация “Системы прецизионного приборостроения”,
ул. Авиамоторная, 53, Москва, 111024 Россия

*E-mail: adikbu@yandex.ru

**E-mail: irkuzmina@bk.ru

Поступила в редакцию 06.04.2021 г.

После доработки 26.05.2021 г.

Принята к публикации 09.06.2021 г.

Разработаны математические модели атмосферы для лазерной длины волны 0.532 мкм, включающие оптические характеристики кристаллической среды для агрегатных структур ледяных частиц. Выполнены расчеты переноса оптического излучения субнаносекундных лазерных импульсов наземных станций на высокоорбитальные и низкоорбитальные космические аппараты при наличии облаков верхнего и среднего ярусов. Показано, что принципы беззапросной лазерной дальнометрии могут быть реализованы при наличии на небосводе фронтальных перистых, перисто-слоистых и перисто-кучевых облаков, а также высоко-слоистых облаков с установленными ограничениями по оптической толщине.

Ключевые слова: фронтальная облачность, кристаллические облака верхнего и среднего ярусов, лазерная дальнометрия, импульсная характеристика, метод Монте-Карло

DOI: 10.31857/S0002351521050035

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время практически показана возможность создания и оснащения космических аппаратов (КА) прецизионной аппаратурой, способной измерять время прихода оптических сигналов с погрешностью до десятых долей наносекунды [1]. Тогда при наличии хранителей времени со значениями относительной суточной стабильности частоты порядка 10^{-14} – 10^{-15} можно говорить о синхронизации шкал времени на существенно удаленных друг от друга наземных и космических объектах с субнаносекундными масштабами погрешностей.

Измерения и обработка времен t прохождения лазерного импульса от наземной станции до КА в данном случае выполняется наземным и бортовым сегментами беззапросной (односторонней) квантово-оптической системы (БКОС) [1]. Наземная станция излучает субнаносекундные импульсы в направлении на КА и в наземной шкале времени регистрирует моменты их старта. Аппаратура бортового сегмента позволяет с субнаносекундной погрешностью регистрировать момент

прихода импульса в бортовой шкале времени [2]. Данная информация по радиоканалу передается на наземную станцию, где определяется значение времени t . Расстояния, рассчитываемые по данному времени и называемые псевдодальностями [1, 2], обладают погрешностями порядка единиц сантиметров и менее. Наземная станция имеет также дальномерную аппаратуру для определения дальности по времени прихода оптического импульса, отраженного ретрорефлекторной системой КА. Сравнение полученных значений дальности и псевдодальности дает возможность синхронизировать временные шкалы на наземной станции и КА, а также может быть положено в основу синхронизации временных шкал ряда наземных станций.

Выполненный космический эксперимент по прецизионной синхронизации шкал времени на базе группировки наземных БКОС, установленных на лазерных станциях в различных географических зонах территории РФ и на оснащем бортовым терминалом БКОС КА “ГЛОНАСС-М” [2], показал, что используемые принципы функционирования беззапросных систем дают повод пере-

смотреть ограничения на допустимые значения параметров трассы распространения излучения. В частности, в эксперименте впервые был обнаружен факт приема лазерных импульсов на борту КА при наличии слоистообразной облачности над территорией расположения наземной лазерной станции (прием лазерных импульсов при разорванной облачности является самостоятельной задачей). Этот результат требует дальнейшего изучения и в случае подтверждения может заметно повысить эффективность функционирования (технологичность) лазерных станций в режиме лазерной дальнометрии.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

С учетом вышесказанного целью данной работы является оценка возможности присутствия определенных типов и форм облачности на небосводе, допускающих прием и определение параметров лазерных импульсов при функционировании БКОС. Работа выполняется методом математического моделирования процессов генерации, распространения и приема лазерного излучения в условиях молекулярно-аэрозольной оптической модели атмосферы при наличии слоистообразных облаков верхнего и среднего ярусов в основном фронтального происхождения.

К задачам, поставленным и решаемым в работе, следует отнести:

- разработку оптической модели атмосферы, включающей в себя слоистообразные облака верхнего и среднего ярусов и методики расчета переноса лазерного импульса на трассах “земля–космос” на основе метода Монте-Карло;

- исследование влияния структуры и параметров выделенных форм облаков на пространственно-временные и энергетические характеристики прямого и рассеянного компонентов лазерного излучения на входе приемной бортовой аппаратуры БКОС при различных углах расходимости исходного импульса и визирования на КА.

Исходные данные в части передачи и приема лазерных импульсов в определенной мере привязаны к характеристикам наземного и бортового сегментов БКОС. Лазерный импульс, излучаемый наземной станцией, расположенной на высоте H_n , характеризуется длиной волны излучения λ , энергией G , длительностью Δ_0 , временной функцией потока $F(t)$, подчиняющегося нормальному закону распределения с модой в центре Δ_0 . Расходимость луча лазера γ может изменяться от единиц угловых секунд до десятков угловых минут; текущие значения углов вылета фотонов в пределах γ распределены нормально относительно оси импульса. Направление визирования на КА (зенитный угол ψ) имеет пределы

изменения от нуля (направление в зенит) до 20 и более градусов. Высота источника задается равной 0.3 км, лазерная длина волны излучения $\lambda = 0.532$ мкм, $\Delta_0 = 0.3$ нс.

Бортовой сегмент БКОС, осуществляющий регистрацию лазерных импульсов, может быть расположен на высокоорбитальных или низкоорбитальных КА с высотами 19 100 и 400 км соответственно. Поскольку вопросы регистрации лазерных импульсов в работе не затрагиваются, то исследования ограничиваются оценкой плотностей потока на входе приемных устройств.

ОПТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ЗАДАЧИ

Газовая атмосфера. Объемный показатель молекулярного рассеяния излучения β_m с учетом поправки Кабанна–Кинга на анизотропию молекул [3] на уровне земли для $\lambda = 0.53$ мкм принят равным 1.462×10^{-2} км⁻¹. Используемый вертикальный профиль показателя молекулярного рассеяния β_m рассчитан на основе известных спектральных схем с поправками на более современные модели LOWTRAN, учитывающие высотную стратификацию основных метеоэлементов атмосферы (температуры, давления, концентрации газов) [4, 5]. Значения β_m получены для длины волны $\lambda = 0.532$ мкм и привязаны к высотам середин атмосферных слоев. Здесь и далее используется стратифицированная модель атмосферы с разбиением по высоте на 17 слоев с верхней границей (“потолок”) на уровне 100 км. Релеевская индикатриса рассеяния χ_m (μ) с учетом факторов анизотропии p_a и деполяризации p_d , составляющих соответственно 0.0178 и 0.035, задавалась согласно работе [3].

Аэрозольная атмосфера. Выполненный аналитический обзор проектов, связанных с изучением аэрозоля (WCP, EARLINET, AERONET, пакет расчетных программ OPAC и др. [4, 6–9]), показывает, что для $\lambda = 0.532$ мкм вертикальные профили показателей ослабления, рассеяния и поглощения на континентальном аэрозоле с наиболее частой высотной сеткой получены в ИОА СО РАН [10]. Высотный диапазон профилей находится в наиболее ответственной зоне изменения высот $0 \leq z \leq 30$ км. На больших высотах использовалась рекомендуемая экспертами WCP модель из работы [4], включающая в себя данные по фоновому (BSA) и вулканическому (VSA) стратосферным аэрозолям, аэрозолю верхней атмосферы и позволяющая пересчитать значения показателей ослабления σ_a (а также β_a и δ_a) на расчетную длину волны $\lambda = 0.532$ мкм. Данная синтетическая модель профиля из работы [10] с учетом вышеназванного дополнения показана на рис. 1.

Заданные значения показателей ослабления σ_a , рассеяния β_a , поглощения δ_a аэрозоля на уров-

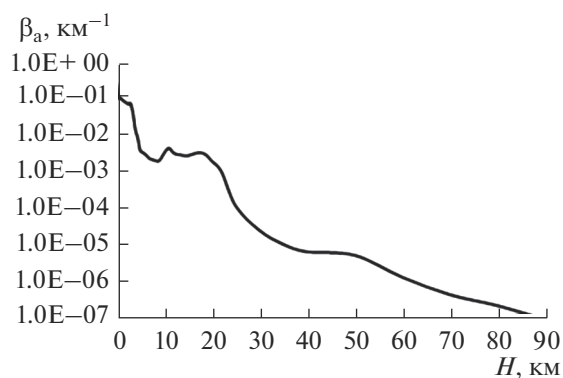


Рис. 1. Высотный ход показателя аэрозольного рассеяния для $\lambda = 0.532$ мкм.

не земли для длины волны $\lambda = 0.53$ мкм и метеорологической дальности видимости $S_m = 4$ км составляют соответственно 1.04×10^{-1} , 9.31×10^{-2} и 1.09×10^{-2} км⁻¹. Используемая в расчетах индикатриса рассеяния для $\lambda = 0.532$ мкм получена на основе данных работы [11]. Данная индикатриса соответствует характеристикам частиц континентального аэрозоля, присутствующих в областях тропосферы и стратосферы. На больших высотах ($z \geq 30$ – 40 км) с большой вероятностью могут находиться многослойные частицы фонового космического происхождения, в том числе имеющие твердые металлические ядра. Вид индикатрисы рассеяния для модели мезосферного аэрозоля и длины волны $\lambda = 0.53$ мкм получен в работе [10]. Композиция индикатрис, полученных из работ [10, 11], позволяет моделировать угловое аэрозольное рассеяние с учетом особенностей верхней атмосферы.

Облачная среда. Проанализируем сначала выбор форм и параметров слоистообразной фронтальной облачности, принципиально допускающих прием лазерных импульсов на борту КА. Теплые фронты над своей поверхностью формируют следующие основные формы облаков, ранжированные по высоте сверху вниз [12, 13, 16]:

- перистые облака *Ci*, представляющие собой сплошной (иногда разорванный) слой толщиной $\Delta H \leq 2$ – 3 км, расположенный под тропопаузой;

- перисто-слоистые облака *Cs*, представляющие собой сплошную белую пелену толщиной $\Delta H = 0.1$ – 3 км и высотой нижней границы $H_{нг} = 6$ – 8 км;

- системы облаков *Ci*–*Cs*, представляющие собой самостоятельный слой, высота верхней границы которого близка к тропопаузе;

- перисто-кучевые облака *Cc* – тонкие облака в виде волн, хлопьев или ряби с $H_{нг} = 6$ – 8 км и толщиной $\Delta H = 0.2$ – 0.4 км;

- высоко-слоистые облака *As*, имеющие вид матового слоя толщиной $\Delta H \approx 1$ км и высотой основания $H_{нг} = 3$ – 5 км.

Холодные медленно перемещающиеся фронты в теплом воздухе перед линией фронта образуют преимущественно перисто-слоистые *Cs* и высоко-слоистые *As* формы облаков с вышеприведенными параметрами. Реже наблюдаются облачные слои *Ci*, *Cc* и высоко-кучевые облака *Ac*. В холодных быстро перемещающихся фронтах облака *As* и *Cs* отсутствуют. Для всех типов фронтов, вероятность кристаллической фазы для облаков *As* и *Ac* не превышает 40 и 7 процентов соответственно [12, 13], поэтому облака *Ac* далее не рассматриваются.

С учетом общей теории переноса оптического излучения и особенностей задач лазерной локации [14] можно предположить, что прием лазерных импульсов от наземной системы на борту КА при наличии слоистообразной облачности можно осуществлять по крайней мере в двух случаях:

- при наличии слоев облачности, способных пропустить необходимое для решения задачи количество прямого излучения;

- при наличии более плотной облачности с использованием рассеянного излучения, если его амплитудно-временные характеристики будут соответствовать требованиям БКОС к обеспечению субнаносекундной погрешности регистрации моментов прихода импульсов [1, 2].

Для первого случая с учетом вышесказанного из перечисленных форм облаков для дальнейших исследований целесообразно выбрать кристаллические облака перистых форм фронтальной облачности *Ci*, *Cs* и *Cc*. Данные облака состоят в основном из ледяных кристаллов с размерами ~ 10 – 1000 мкм. Обычное отсутствие капельной фракции воды и сравнительно низкие концентрации кристаллов делают, перистые облака оптически тонкими, обладающими большой прозрачностью [13, 15, 16]. Оптические толщины перистых форм облачности по данным различных источников изменяются от долей единицы до нескольких единиц, хотя в модельном плане используются значения τ до 10 и более единиц [15]. Альбеда однократного рассеяния в облачном веществе $\omega \approx 1$ [13, 15]. Фронтальные облака *As* также могут пропускать прямое излучение, но в общем случае их оптические толщины могут достигать 10 и более единиц [13]. В табл. 1 представлены варианты форм слоистообразной облачности верхнего и среднего ярусов со значениями геометрических и оптических параметров, перспективных для исследования особенностей переноса лазерного излучения на трассах “земля–космос”. В таблице приведены также повторяемости исследуемых форм облачности над различными регионами территории РФ согласно данным работ [12, 13] (без указания

Таблица 1. Формы и параметры облаков, перспективных для оценки возможности лазерной локации при их присутствии на небосводе

Номер варианта	Форма облаков	Параметры облаков			Вероятность присутствия на небосводе, %
		$H_{нг}$, км	ΔH , км	τ	
1	<i>Ci</i>	9	2	0.2–1	20–30
2	<i>Ci</i>	9	3	2	
3	<i>Cc</i>	7	0.3	1	3–15
4	<i>Cs</i>	7	0.1	0.5	6–18
5	<i>Cs</i>	7	1	3	
6	<i>As</i>	5	1	5	4–30
7	<i>As</i>	5	1	7	
8	<i>As</i>	5	1.5	10	

других форм облачности, которые могли наблюдаться одновременно с вышеуказанными).

Исследования оптических характеристик кристаллических облаков верхнего и среднего ярусов активно проводятся наземными и космическими средствами в рамках национальных и международных радиационных и климатических проектов. К наиболее значительным наземным программам следует отнести: International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP), European Cloud and Radiation Experiment (EUCREX), Subsonic Aircraft Contrail and Cloud Effects Special Study (SUCCESS), CRYSTALFACE, Atmospheric Radiation Measurement (ARM) и др. [17, 18]. Отечественные исследования частиц и слоев в кристаллических облаках на протяжении многих лет проводятся в ИОА им. В.Е. Зуева СО РАН [19] и ЦАО Росгидромет [20].

Космические радиометрические системы позволяют с высоким пространственным разрешением получать микрофизические, оптические, спектральные, поляризационные и другие характеристики облаков верхнего яруса. Наиболее известными из них являются Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), Advanced Along Track Scanning Radiometer (AATSR), Polarization Detecting Environmental Radiometer (POLDER), Advanced Very-High-Resolution Radiometer (AVHRR) [17, 21, 22]. Для измерения и восстановления вертикальных профилей оптических и микрофизических параметров облаков используются данные космических программ на базе лидаров LITE, BALKAN, ESA Earth Explorer, ALADIN [17, 23]. Следует отметить спутник CALIPSO с лидаром CALIOP для наблюдений характеристик облаков на длине волны 0.532 мкм [17, 24].

Анализ полученного экспериментального материала по исследованию ледяных кристаллов облаков верхнего яруса (*Ci*, *Cs*, *Cc*) показал суще-

ственное разнообразие их форм и размеров [25, 26], а также способность кристаллов объединяться в устойчивые структуры (агрегаты). В работах [27–29] показано, что в формировании наиболее важной для данной задачи области малых углов рассеяния основная роль принадлежит дифракции излучения. Зависимость вида индикатрис рассеяния от длины волны излучения при разных структурах и эффективных диаметрах $d_{эфф}$ ледяных кристаллов, дающих наибольший вклад в ледность облака, изучалась в работах В.А. Ваум et al. [27, 28]. Вид индикатрис χ_o (μ) для $\lambda = 0.53$ мкм и смешанной структуры (GHM) частиц, содержащей базовую форму (SolidCol) и агрегаты (Aggr-SolidCol), показан на рис. 2.

Для оценки возможности регистрации узконаправленного излучения наземного лазера с минимальным искажением времени прохождения трассы, необходимо знание тонкой угловой структуры функции рассеяния в области первых единиц угловых минут. В табл. 2 представлены значения индикатрис ледяных кристаллов в угловой области рассеяния от нуля до 1 град для эффективных диаметров частиц 70 и 120 мкм, полученные в работе [28]. Из табл. 2 следует, что при изменении θ от нуля до 0.5 град значения индикатрис χ_o (μ) падают в 650 раз при $d_{эфф} = 70$ мкм и почти в 6000 раз – при $d_{эфф} = 120$ мкм.

О влиянии ориентации кристаллов на асимметрию рассеяния в области малых углов можно сказать следующее. В реальных кристаллических средах преимущественную ориентацию может приобретать только часть кристаллов, имеющих в основном правильные геометрические формы, что подтверждается полученными экспериментальными и теоретическими результатами [29, 30]. В случае произвольной ориентации частиц в кристаллической среде асимметрии рассеяния относительно направления падающего излучения не отмечается [15]. При используемой модели

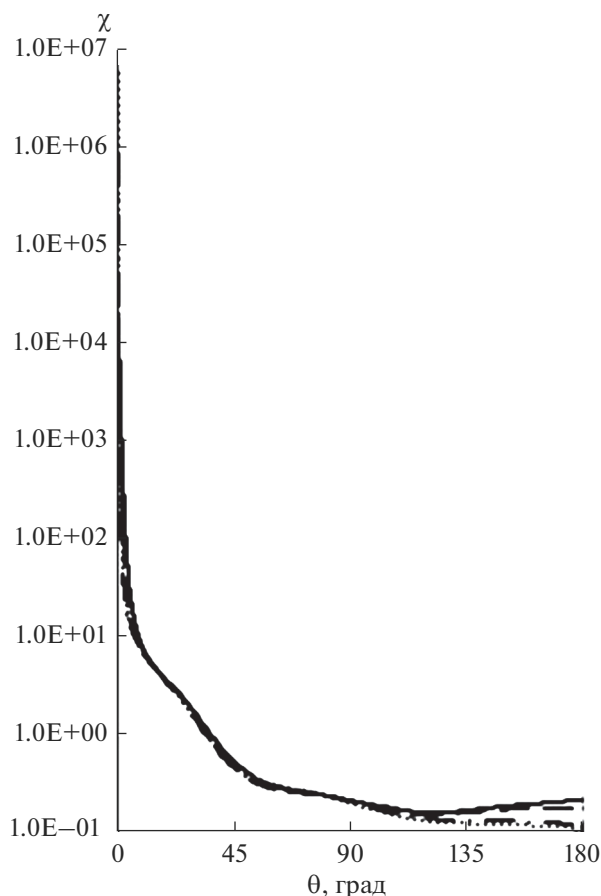


Рис. 2. Индикатрисы рассеяния для смешанной структуры ледяных кристаллов. $\lambda = 0.53$ мкм. Сплошные линии – $d_{\text{эфф}} = 10$ мкм, штриховые – $d_{\text{эфф}} = 30$ мкм, штрихпунктирные – $d_{\text{эфф}} = 70$ мкм, пунктирные – $d_{\text{эфф}} = 120$ мкм.

Таблица 2. Малоугловая область индикатрисы рассеяния ледяных кристаллов ГНМ (смесь) для длины волны $\lambda = 0.53$ мкм при различных эффективных диаметрах $d_{\text{эфф}}$ частиц

Угол рассеяния θ , градусы	Эффективный диаметр частицы, $d_{\text{эфф}}$, мкм	
	70	120
0	833 300	5633 000
0.01	802 000	3834 000
0.02	721 300	2026 000
0.03	617 200	1 111 000
0.04	511 600	659 600
0.05	416 500	423 800
0.06	336 100	289 300
0.08	217 700	151 500
0.1	142 700	86 820
0.3	5760	3964
0.5	1282	941.20
0.7	479	372.40
0.9	234.70	189.60
1	175.70	144.80

ГНМ в силу хаотичности размеров и форм кристаллов эффекты асимметрии рассеяния не учитываются.

Согласно данным работ [9, 18, 20], типовые значения показателей ослабления σ_0 облаков верхнего яруса изменяются в пределах от 0.1 до 1.4 км⁻¹, максимальные значения могут достигать 2.4 км⁻¹. По данным [13], средние значения σ_0 для облаков *Ci* и *Cs* не превосходят 2.5 км⁻¹. Внутри облаков показатель ослабления принимается постоянным.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОРБИТАХ КА ПРИ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ОБЛАКАХ

Приведенные выше результаты позволяют разработать математические модели исследуемых форм облаков. Известные подходы к формулировке и решению лидарного уравнения, к расчету бугеровского ослабления светового луча позволяют решить рассматриваемую задачу для прямого излучения с помощью аналитических вычислений [14]. Однако в данном случае алгоритмы расчета прямого излучения входят как составная часть в общую программу расчета пространственно-временных характеристик поля излучения лазерного импульса, реализуемую с помощью метода Монте-Карло, основные положения которого для сферической геометрии земли и импульсных источников света изложены, в частности, в работах [31, 32]. Это существенно упрощает моделирование сложных функций для задания угловых и временных характеристик лазерного импульса, излучаемого наземной станцией, моделирование облаков с учетом их фазовой структуры и высотного хода объемных показателей рассеяния и ослабления, учет сферичности земли и атмосферы для наклонных углов визирования. Так как исследования проводились для лазерной длины волны $\lambda = 0.532$ мкм в направлениях зондирования, близких к зениту, газовое поглощение в расчетах не учитывалось. Определяемыми величинами в расчетах являются коэффициенты ослабления E лазерного излучения и импульсные характеристики $J(t)$, представляющие собой реакцию трассы на δ -импульс.

Прямое излучение. В общем случае коэффициент ослабления E на заданном расстоянии от излучателя является функцией оптической толщины облачности, угла визирования на КА, высоты орбиты и расходимости луча лазера. Параметры безоблачной атмосферы, заданные в соответствии со спектральными моделями газовой составляющей и аэрозоля, не изменяются при выполнении расчетов. Оптическая толщина облаков варьируется от 0.2 до 10 единиц, включая в себя диапазон ее возможных значений из перечня оптико-геометрических характеристик выделен-

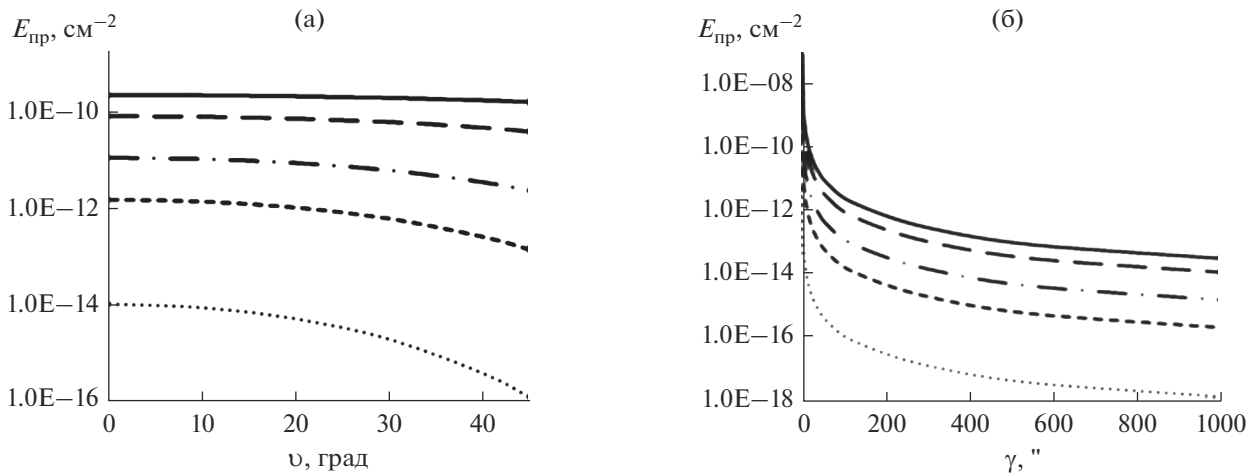


Рис. 3. Зависимости коэффициента ослабления прямого излучения $E_{пр}$ от угла визирования ν (а) и расходимости луча лазера γ (б) и при прохождении кристаллического облака. $H_{ист} = 0.3$ км; $H_{орб} = 19100$ км. (а) – $\gamma = 10''$; (б) – $\nu = 0^\circ$. Сплошная линия – безоблачно; штриховая (длинный штрих) – $\tau = 1$; штрихпунктирная – $\tau = 3$; штриховая (короткий штрих) – $\tau = 5$; пунктирная – $\tau = 10$.

ных форм облачности. Вид зависимостей коэффициента ослабления прямого излучения $E_{пр}$ от перечисленных параметров показан на рис. 3 и 4.

Графический материал рис. 3а показывает что зависимость $E_{пр}$ от τ усиливается с увеличением угла визирования ν и ростом оптической толщины. Так, при $\tau = 10$ изменение угла визирования ν от 0° до 40° приводит к уменьшению $E_{пр}$ почти в 20 раз. Зависимость $E_{пр}$ от расходимости луча лазера γ наиболее выражена в области малых значений $\gamma \leq 5-10$ угловых секунд, что соответствует пространственному распределению плотности фотонов по поверхности условной сферы с центром в излучателе в окрестности КА. Следует сказать также, что при $\nu = 0^\circ$ для значений оптической толщины облаков $0.2 \leq \tau \leq 10$ размах значений коэффициента ослабления прямого излучения $E_{пр}$ составляет около четырех порядков при визировании в область зенита.

Рассеянное излучение. Расчет и анализ коэффициентов ослабления рассеянного излучения $E_{рс}$ лазерного импульса показали, что зависимости $E_{рс}$ от оптических и геометрических параметров задачи существенно отличаются от подобных зависимостей коэффициента ослабления прямого излучения $E_{пр}$ (см. рис. 5 и 6).

Из графиков рис. 5 и 6 следует, что в данном случае не сохраняется постоянство отношений $E_{рс}$ для различной расходимости луча с изменением оптической толщины τ облаков. На рис. 6 показана зависимость коэффициента $E_{рс}$ от оптической толщины кристаллических облаков, состоящих из смеси частиц с $d_{эфф} = 120$ мкм, при различных углах γ . Видно, что коэффициент $E_{рс}$ имеет максимум в области изменения τ от 1 до 3 единиц. Крутизна спада значений $E_{рс}$ после

максимума значительно меньше, чем крутизна нарастания.

Подобные расчеты выполнены для КА с высотой орбиты $H_{орб} = 400$ км. Для сохранения приблизительного равенства времен нахождения КА в области свечения лазера диапазон значений расходимости луча γ привязан к высоте 400 км.

Сравнительные значения коэффициентов ослабления прямого и рассеянного излучения лазерного импульса, полученные при различных оптических толщинах кристаллических облаков и расходимости луча γ , приведены в табл. 3. Видно, что для высо-

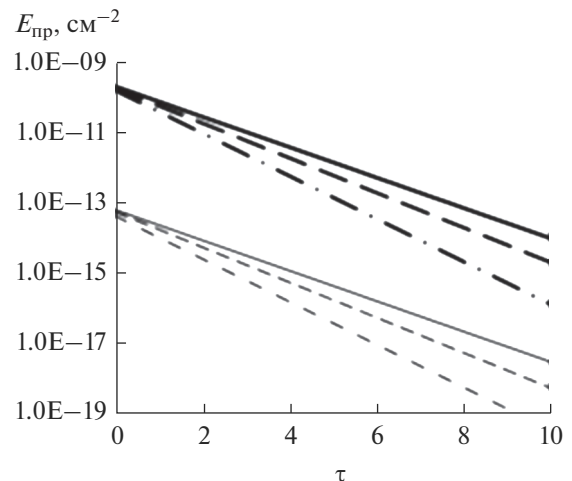


Рис. 4. Зависимость коэффициента ослабления прямого излучения $E_{пр}$ от оптической толщины кристаллического облака. $H_{ист} = 0.3$ км; $H_{орб} = 19100$ км. Сплошная линия – угол визирования $\nu = 0^\circ$; штриховая – $\nu = 30^\circ$; штрихпунктирная – $\nu = 45^\circ$. Толстые линии – угол расходимости луча лазера – $\gamma = 10'$; тонкие – $\gamma = 10''$.

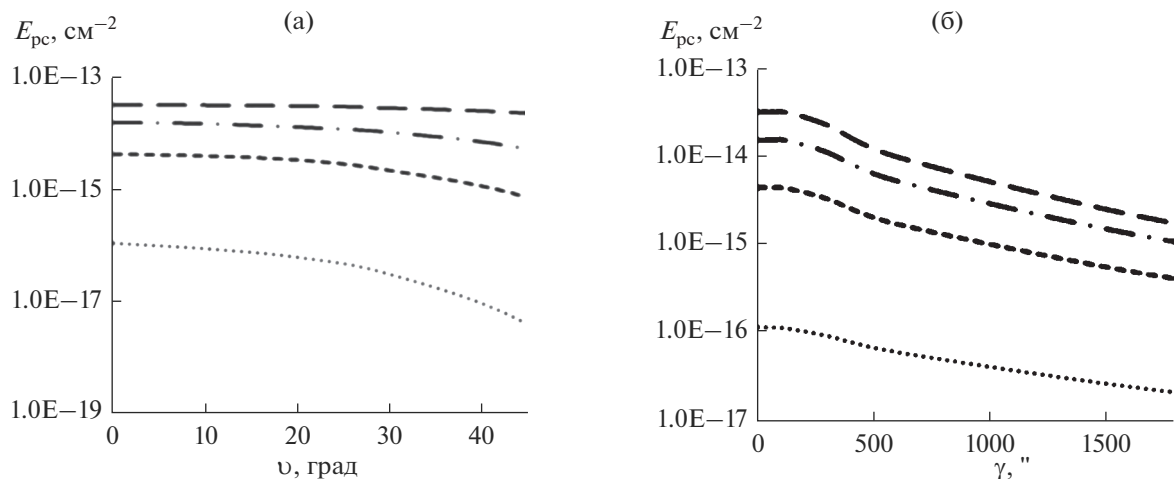


Рис. 5. Зависимости коэффициента ослабления рассеянного излучения E_{sc} от угла визирования ν (а) и расходимости луча лазера γ (б). Модель кристаллических частиц ГНМ с $d_{эфф} = 120$ мкм; $H_{ист} = 0.3$ км; $H_{орб} = 19\,100$ км. (а) – $\gamma = 10''$; (б) – $\nu = 0^\circ$. Сплошная линия – безоблачно; штриховая линия (длинный штрих) – $\tau = 1$; штрихпунктирная – $\tau = 3$; штриховая (короткий штрих) – $\tau = 5$; пунктирная – $\tau = 10$.

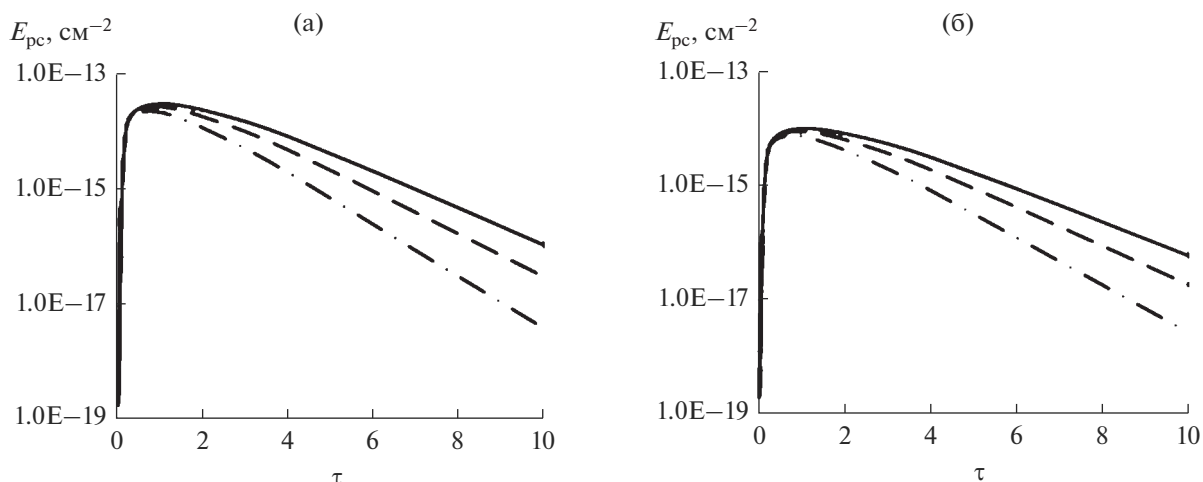


Рис. 6. Зависимость коэффициента ослабления рассеянного излучения E_{sc} от оптической толщины кристаллического облака. $H_{ист} = 0.3$ км; $H_{орб} = 19\,100$ км; модель частиц ГНМ с $d_{эфф} = 120$ мкм. (а) – $\gamma = 10'$; (б) – $\gamma = 10'$. Сплошная линия – угол визирования $\nu = 0^\circ$; штриховая – $\nu = 30^\circ$; штрихпунктирная – $\nu = 45^\circ$.

коорбитальных КА коэффициент E_{sc} не превосходит коэффициент ослабления $E_{пр}$ при углах $\gamma \leq 1'$ и оптических толщинах $\tau \leq 10$ единиц (при $\gamma = 1'$ доля рассеянного излучения может составлять около 40% от прямого). Для низкоорбитальных КА коэффициент E_{sc} практически сравнивается по величине с $E_{пр}$ при $\gamma = 10'$ и оптических толщинах $\tau \approx 1$ и превосходит $E_{пр}$ почти на порядок при $\tau = 7$. С увеличением угла γ до $30'$ превосходство E_{sc} над $E_{пр}$ наблюдается на всем рассматриваемом диапазоне $\tau > 1$.

Для обоснования возможности использования рассеянного излучения в процедурах локации БКОС требуется установить временное смещение рассеянного сигнала относительно исходного

импульса. Поэтому в данном случае важными физическими величинами являются импульсные характеристики трасс распространения фотонов, определяющие степень “размытия” импульса во времени. Вид рассчитанных импульсных характеристик для различных оптических толщин и индикатрис рассеяния кристаллических облаков показан на рис. 7.

СИГНАЛЫ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОРБИТАХ КА ПРИ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ОБЛАКАХ

Сигнал лазерного излучения на орбите КА понимается как функция плотности потока оптического излучения от времени $\Phi(t)$, Вт см^{-2} . Для

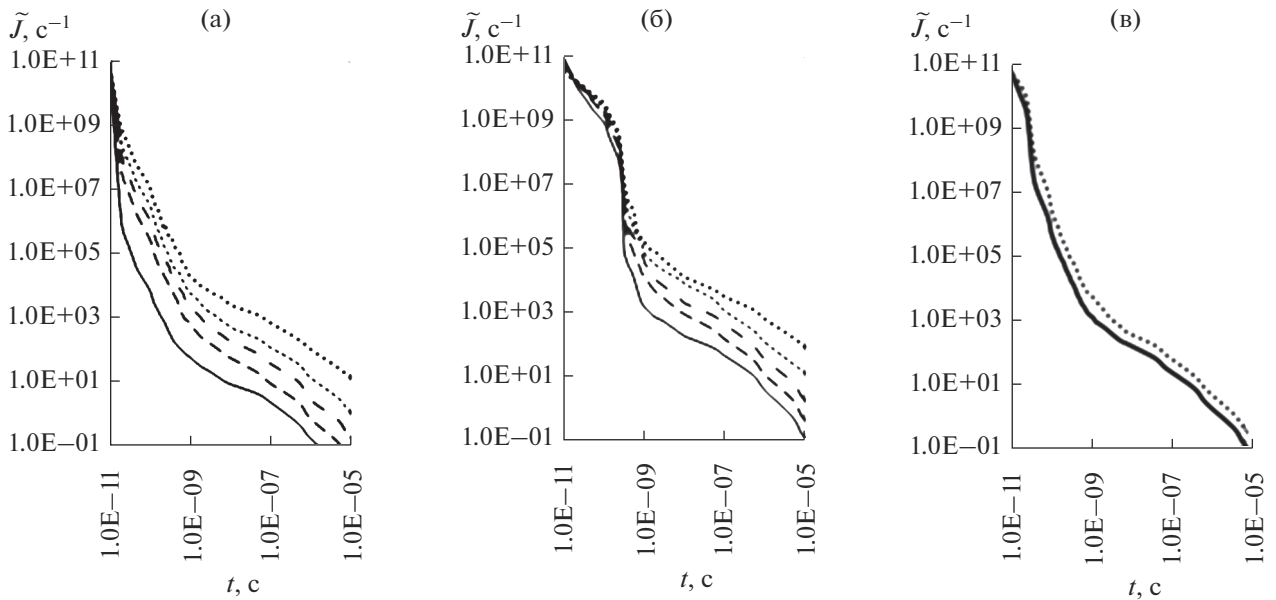


Рис. 7. Нормированные импульсные характеристики трассы распространения лазерного излучения при кристаллических облаках. $H_{ист} = 0.3$ км; $\nu = 0^\circ$. (а) – $\gamma = 10^\circ$, модель частиц ГНМ с $d_{эфф} = 120$ мкм, сплошная линия – $\tau = 0.2$; штриховая (длинный штрих) – $\tau = 3$; штрихпунктирная – $\tau = 5$; штриховая (короткий штрих) – $\tau = 7$; пунктирная – $\tau = 10$; (б) – $\gamma = 30^\circ$, остальное то же самое; (в) – $\gamma = 10^\circ$, $\tau = 3$, модели частиц ГНМ с $d_{эфф} = 120$ мкм (сплошная линия) и с $d_{эфф} = 70$ мкм (пунктирная).

прямого излучения плотность потока $\Phi_{пр}(t)$ связана с коэффициентом ослабления $E_{пр}$ линейным соотношением, а сигнал рассеянного излучения рассчитывается с применением аппарата математической свертки

$$\Phi_{рс}(t) = \int_0^t F(t-t')J(t')dt'. \tag{1}$$

При расчетах $\Phi(t)$ энергия лазерного импульса задается типовым для систем лазерной локации

Таблица 3. Сравнительный вид коэффициентов ослабления прямого и рассеянного излучения лазерного импульса на различных высотах орбит. $H_{ист} = 0.3$ км. $\nu = 0^\circ$. Модель частиц ГНМ с $d_{эфф} = 120$ мкм

Опт. толщина, τ	Коэффициенты ослабления, $см^{-2}$	Расходимость луча, γ					
		Высота орбиты 19 100 км			Высота орбиты 400 км		
		2"	10"	1'	1'	10'	30'
0.2	$E_{пр}$	4.71×10^{-9}	1.89×10^{-10}	5.24×10^{-12}	1.20×10^{-8}	1.20×10^{-10}	1.33×10^{-11}
	$E_{рс}$	1.34×10^{-14}	1.34×10^{-14}	1.33×10^{-14}	3.07×10^{-11}	9.16×10^{-12}	1.53×10^{-12}
1	$E_{пр}$	2.12×10^{-9}	8.47×10^{-11}	2.35×10^{-12}	5.37×10^{-9}	5.37×10^{-11}	5.97×10^{-12}
	$E_{рс}$	3.22×10^{-14}	3.22×10^{-14}	3.21×10^{-14}	7.35×10^{-11}	2.28×10^{-11}	4.00×10^{-12}
3	$E_{пр}$	2.87×10^{-10}	1.15×10^{-11}	3.18×10^{-13}	7.27×10^{-10}	7.27×10^{-12}	8.08×10^{-13}
	$E_{рс}$	1.56×10^{-14}	1.56×10^{-14}	1.54×10^{-14}	3.57×10^{-11}	1.22×10^{-11}	2.47×10^{-12}
5	$E_{пр}$	3.88×10^{-11}	1.55×10^{-12}	4.31×10^{-14}	9.84×10^{-11}	9.84×10^{-13}	1.09×10^{-13}
	$E_{рс}$	4.32×10^{-15}	4.32×10^{-15}	4.29×10^{-15}	9.86×10^{-12}	3.77×10^{-12}	8.98×10^{-13}
7	$E_{пр}$	5.25×10^{-12}	2.10×10^{-13}	5.83×10^{-15}	1.33×10^{-11}	1.33×10^{-13}	1.48×10^{-14}
	$E_{рс}$	1.03×10^{-15}	1.03×10^{-15}	1.02×10^{-15}	2.35×10^{-12}	1.02×10^{-12}	2.85×10^{-13}
10	$E_{пр}$	2.61×10^{-13}	1.05×10^{-14}	2.90×10^{-16}	6.63×10^{-13}	6.63×10^{-15}	7.37×10^{-16}
	$E_{рс}$	1.12×10^{-16}	1.12×10^{-16}	1.11×10^{-16}	2.54×10^{-13}	1.34×10^{-13}	4.72×10^{-14}

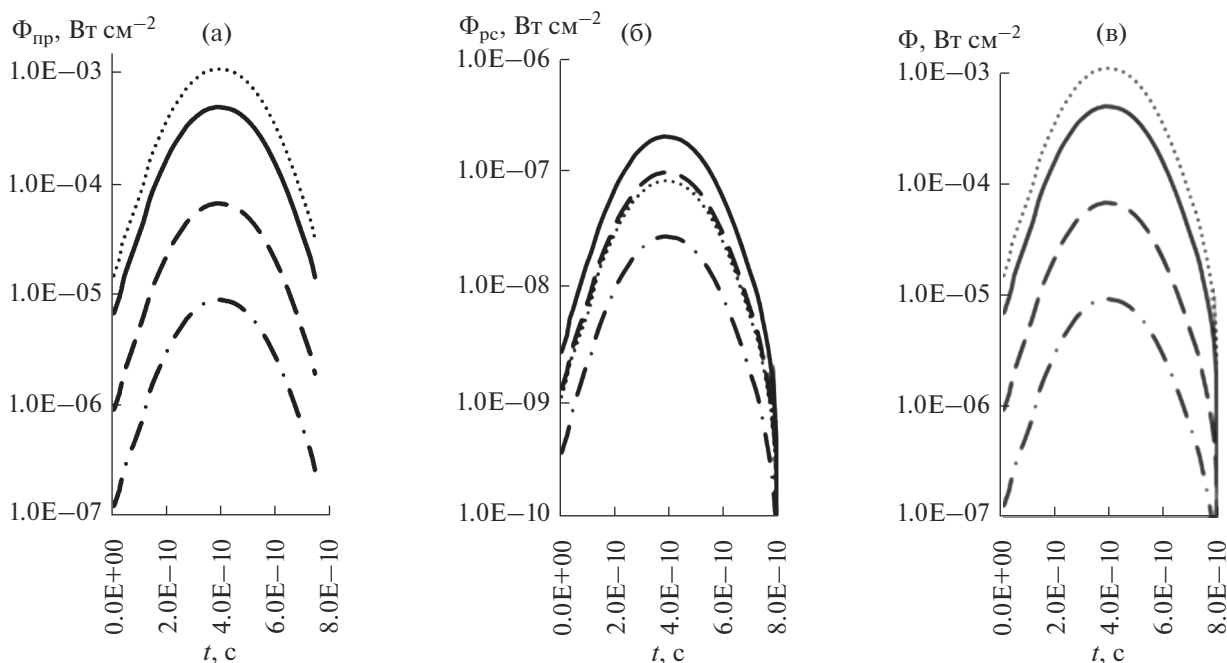


Рис. 8. Плотности потока прямого (а), рассеянного (б) и суммарного (в) излучений лазерного импульса на орбите КА с высотой $H_{орб} = 19100$ км. $G = 2$ мДж; $\Delta_0 = 0.3$ нс; $H_{ист} = 0.3$ км; $\nu = 0^\circ$. $\gamma = 10''$. Модель частиц ГНМ с $d_{эфф} = 120$ мкм. Пунктирная линия – $\tau = 0.2$; сплошная линия – $\tau = 1$; штриховая – $\tau = 3$; штрихпунктирная – $\tau = 5$.

значением $G = 2$ мДж. Вид полученных сигналов в зависимости от оптической толщины τ и угла расходимости γ показан на рис. 8–9.

Анализируя зависимости на рис. 8–9 совместно с данными табл. 1, определим значения плотностей потоков на момент максимума сигналов лазерного излучения на входе бортовой приемной аппаратуры БКОС, соответствующие характеристикам выбранных форм и параметров облаков. Результаты анализа представлены в табл. 4.

Сравнение уровней плотностей потока суммарного излучения Φ для безоблачной атмосферы и перистых форм облаков, приведенных в таблице 3, показывает, что отношения указанных величин не превосходят 20 раз. При высокослоистых облаках с оптическими толщинами 5–10 единиц и малой расходимостью луча лазера γ (высокие орбиты) эти отношения практически совпадают с бугеровским ослаблением $e^{-\tau}$, изменяющимся от $6.7 \cdot 10^{-3}$ до $4.5 \cdot 10^{-5}$ для рассматриваемых условий. При значениях $\gamma = 10' - 30'$ (низкие орбиты) эти отношения в существенной степени определяются рассеянным компонентом излучения и составляют $3 \cdot 10^{-2} - 3 \cdot 10^{-3}$ долей единицы. Обращаясь к данным рис. 9, следует также отметить тенденцию снижения плотности потока рассеянного излучения лазерного импульса на входе приемной аппаратуры с уменьшением эффективного диаметра частиц. Так, при уменьшении $d_{эфф}$ от 120 до 70 мкм отношения соответствующих плотностей потока составляют приблизительно 6.3–6.6 при $\gamma = 10''$ и

1.6–2 – при $\gamma = 30'$ и слабо зависят от оптической толщины облака.

Для того, чтобы рекомендовать для использования в решаемой задаче рассеянный компонент излучения, помимо энергетической составляющей, необходимо, как было сказано ранее, установить условия, при которых временной сдвиг сигнала не выходит из субнаносекундной области. Из графического материала рис. 9 следует, что рассчитанные значения сдвига времен максимума рассеянного излучения относительно исходного импульса составляют порядка $(3 - 3.5) \times 10^{-11}$ с, если задана модель частиц ГНМ с $d_{эфф} = 120$ мкм. Если диаметр $d_{эфф}$ положить равным 70 мкм [28] (см. также табл. 2), то сдвиг времен максимума увеличивается, но не превышает 5×10^{-11} с. В обоих случаях сдвиг максимума составляет сотые доли наносекунды, что свидетельствует о возможности использования в процедурах БКОС рассеянного компонента лазерного излучения при перечисленных формах и параметрах кристаллических облаков верхнего и среднего ярусов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предварительный анализ оптико-геометрических характеристик облачности показал, что требованиям к передаче и приему лазерных импульсов с наземных станций на КА могут удовлетворять фронтальные облака верхнего яруса, а также облака среднего яруса с определенными

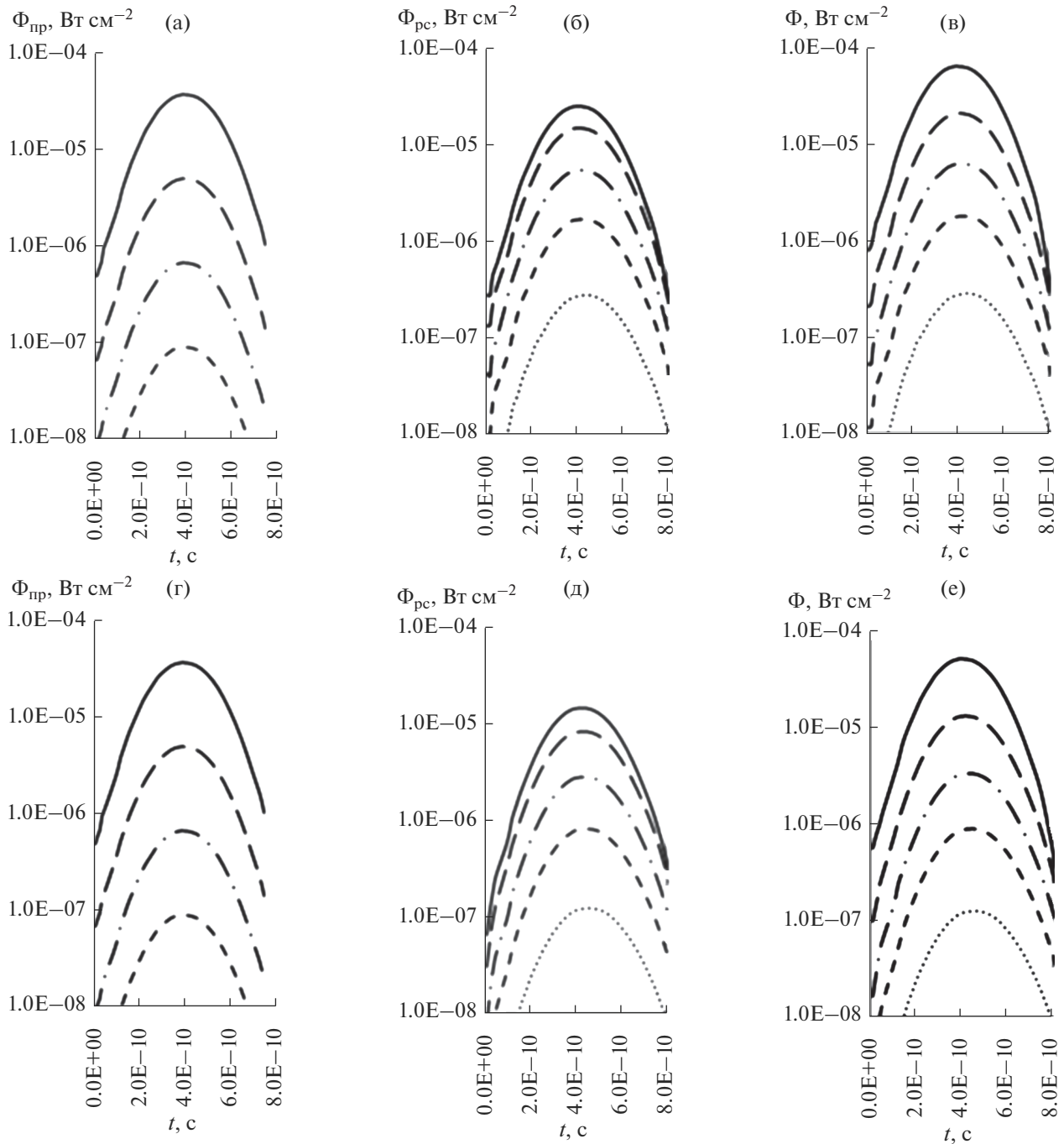


Рис. 9. Плотности потока прямого (а, г), рассеянного (б, д) и суммарного (в, е) излучений лазерного импульса на орбите КА с высотой $H_{орб} = 400$ км. $G = 2$ мДж; $\Delta_0 = 0.3$ нс; $H_{ист} = 0.3$ км; $\nu = 0^\circ$; $\gamma = 30'$. Вверху – модель частиц ГНМ с $d_{эфф} = 120$ мкм, внизу – с $d_{эфф} = 70$ мкм. Сплошная линия – $\tau = 1$; штриховая (длинный штрих) – $\tau = 3$; штрихпунктирная – $\tau = 5$; штриховая (короткий штрих) – $\tau = 7$; пунктирная – $\tau = 10$.

ограничениями по оптической толщине. Для проведения уточняющих расчетов выбрано семь вариантов типовых сочетаний форм и параметров перистых, перисто-кучевых, перисто-слоистых и высоко-слоистых облаков. Расчеты выполнялись методом Монте-Карло, позволяющим исследовать пространственно-временные и

энергетические характеристики полей лазерного излучения на орбитах КА с соответствующими моделями функций источника, среды и условий приема сигналов. Для реализации метода разработаны оптические модели безоблачной атмосферы и выбранных форм кристаллических облаков, алгоритмы переноса прямого и рассеян-

Таблица 4. Амплитуды сигналов суммарного излучения лазерного импульса (Вт см^{-2}) на входе приемной аппаратуры. $\nu = 0^\circ$; $G = 2$ мДж. Модель частиц ГНМ с $d_{\text{эфф}} = 120$ мкм

Вариант модели	Форма облаков	Оптическая толщина облаков, τ	Высота орбиты КА $H_{\text{орб}} = 19100$ км		Высота орбиты КА $H_{\text{орб}} = 400$ км	
			$\gamma = 2''$	$\gamma = 10''$	$\gamma = 10'$	$\gamma = 30'$
	Безобл.	0	3.60×10^{-2}	1.44×10^{-3}	9.12×10^{-4}	1.01×10^{-4}
1	<i>Ci</i>	0.5	2.19×10^{-2}	8.74×10^{-4}	6.62×10^{-4}	7.99×10^{-5}
2	<i>Ci</i>	2	4.88×10^{-3}	1.95×10^{-4}	2.43×10^{-4}	3.57×10^{-5}
3	<i>Cc</i>	1	1.33×10^{-2}	5.30×10^{-4}	4.78×10^{-4}	6.17×10^{-5}
4	<i>Cs</i>	1	1.33×10^{-2}	5.30×10^{-4}	4.78×10^{-4}	6.17×10^{-5}
5	<i>Cs</i>	3	1.79×10^{-3}	7.17×10^{-5}	1.22×10^{-4}	2.01×10^{-5}
6	<i>As</i>	5	2.43×10^{-4}	9.70×10^{-6}	2.97×10^{-5}	6.07×10^{-6}
7	<i>As</i>	7	3.29×10^{-5}	1.31×10^{-6}	7.19×10^{-6}	1.69×10^{-6}
8	<i>As</i>	10	1.64×10^{-6}	6.59×10^{-8}	8.71×10^{-7}	2.92×10^{-7}

ного излучения, пакет расчетных программ на базе алгоритмического языка ФОРТРАН и пакет обрабатывающих программ на базе MAPLE и редактора электронных таблиц Microsoft Excel.

Полученные результаты расчетов содержат необходимые сведения для оценки целесообразности проведения сеансов односторонней лазерной локации высокоорбитальных и низкоорбитальных КА при наличии на небосводе облаков верхнего яруса и слоистых облаков среднего яруса с оптическими толщинами до 5–7 единиц. Ниже приведены несколько конкретных выводов по работе:

– увеличение зенитного угла визирования ν от нуля до 20° – 30° приводит к снижению плотностей потока Φ оптического излучения лазерных импульсов на входе бортовой приемной аппаратуры БКОС высокоорбитальных и низкоорбитальных КА не более чем в 1.5–2 раза при рассматриваемых диапазонах изменения расходимости луча лазера и оптической толщины кристаллических облаков;

– сравнение амплитуд оптических сигналов прямого излучения при безоблачной атмосфере и при перистых формах облаков для высокоорбитальных КА и расходимости луча γ от $2''$ до $10''$ показывает, что их отношения не превосходят 20 раз;

– отношение плотностей потока прямого излучения $\Phi_{\text{пр}}$ лазерных импульсов на орбите КА с высотой $H_{\text{орб}} = 19100$ км при углах γ , равных $2''$ и $10''$, остается постоянным при всех рассматриваемых значениях оптической толщины τ . Отношение плотностей потока Φ суммарного излучения лазерных импульсов на орбите КА с высотой $H_{\text{орб}} = 400$ км при $d_{\text{эфф}} = 120$ мкм и увеличении γ от $10'$ до $30'$ зависит от τ и снижается с 8.3 до 3 при вариациях τ от 0.5 до 10 единиц;

– амплитуды сигналов рассеянного (суммарного) излучения на орбите КА с высотой $H_{\text{орб}} = 400$ км при расходимости луча лазера $\gamma = 30'$ превосходят амплитуды соответствующих сигналов прямого излучения, начиная с оптических толщин $\tau \geq 3$ единиц при $d_{\text{эфф}} \geq 70$ мкм;

– сдвиг времени максимума оптических сигналов рассеянного излучения на орбите КА с высотой $H_{\text{орб}} = 400$ км при расходимости луча $\gamma = 30'$ относительно исходного импульса составляет порядка $(3-3.5) \times 10^{-11}$ с при модели частиц с $d_{\text{эфф}} = 120$ мкм и не превышает 5×10^{-11} с – при $d_{\text{эфф}} = 70$ мкм;

– учитывая, что вероятность присутствия на небосводе кристаллических облаков для территорий РФ достигает 20–30%, возможность проведения односторонней локации КА в их присутствии может существенно повысить эффективность использования наземных лазерных станций.

Перспективные исследования в данном направлении могут быть связаны с уточнением моделей индикатрис рассеяния в области первых угловых секунд, учетом преимущественной ориентации частиц и смешанной микроструктуры облаков.

Благодарности. Авторы выражают глубокую признательность рецензенту за конструктивные рекомендации, позволившие существенно улучшить текст работы. Авторы выражают искреннюю благодарность В.Д. Шаргородскому за предложение темы исследований и ценные консультации в процессе работы, Т.Б. Журавлевой за помощь в получении данных по функциям рассеяния и полезные обсуждения при постановке задачи, Л.В. Добровольской за помощь в обработке расчетных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Садовников М.А., Сумерин В.В., Шаргородский В.Д.* Односторонняя лазерная дальнометрия и ее применение в задачах повышения точности частотно-временного обеспечения ГЛОНАСС // International Technical Workshop WPLTN-2012. Санкт-Петербург, Россия, 2012.
2. *Жабин А.С., Набокин П.И.* Методы достижения субнаносекундной точности измерений интервалов времени в бортовом терминале односторонней лазерной дальномерной системы // Электромагнитные волны и электронные системы. 2013. Т. 18. С. 39–42.
3. *Мак-Картни Э.* Оптика атмосферы. М.: Мир, 1979. 422 с.
4. A preliminary cloudless standard atmosphere for radiation computation // World Climate Research Program (WSP), WSP-112, WMO/TD. 1986. № 24. 60 p.
5. *Kneizys F.X., Robertson D.S., Abreu L.W., Acharya P., Anderson G.P., Rothman L.S., Chetwynd J.H., Selby J.E.A., Shettle E.P., Gallery W.O., Berk A., Clough S.A., Bernstein L.S.* The MODTRAN 2/3 report and LOWTRAN 7 model Phillips Laboratory. Geophysics Directorate. 1996. 260 p.
6. *Ansmann A., Tesche M., Groß S., Freudenthaler V., Seifert P., Hiebsch A., Schmidt J.* The 16 April 2010 major volcanic ash plume over central Europe: EARLINET lidar and AERONET photometer observations at Leipzig and Munich, Germany // Geophys. Res. Lett. 2010. V. 37. P. 13810.
7. *Gérard B., Déuze J.L., Herman M., Kaufman Y.J., Lal-lart P., Oudard C., Remer, B. Roger L. A., Six B., Tanré D.* Comparisons between POLDER 2 and MODIS/Terra aerosol retrievals over ocean // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. P. 24211.
8. Meeting of JSC experts on aerosols and climate. World Climate Research Program (WCP). 1981. 12 p.
9. *Hess M., Koepke P., Schult I.* Optical Properties of Aerosols and Clouds: The Software Package OPAC // Article in Bulletin of the American Meteorological Society. 1998. V. 79. P. 831–844
10. *Креков Г.М., Рахимов Р.Ф.* Оптические модели атмосферного аэрозоля. Томск: Изд-во СО АН СССР, 1986. 294 с.
11. *Дейрменджан Д.* Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 166 с.
12. *Зверев А.С.* Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 712 с.
13. *Облака и облачная атмосфера.* Справочник под ред. Мазина И.П. и Хргиана А.Х. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 648 с.
14. *Лазерный контроль атмосферы.* Под ред. Хинкли Э.Д. М.: Мир, 1979. 416 с.
15. *Волковицкий О.А., Павлова Л.Н., Петрушин А.Г.* Оптические свойства кристаллических облаков. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 200 с.
16. *Фейгельсон Е.М.* Лучистый теплообмен и облака. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 230 с.
17. *Руководство по приборам и методам наблюдений.* ВМО, 2018.
18. *Baum B.A., Kratz D.P., Yang P.* Remote sensing of cloud properties using MODIS airborne simulator imagery during SUCCESS 1. Data and models // J. Geophys. 2000. V. 105. P. 11767–11780.
19. *Konoshonkin A.V., Borovoi A.G., Kustova N.V., Okamoto H., Förstner J.* Light scattering by ice crystals of cirrus clouds: from exact numerical methods to physical-optics approximation // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2017. V. 195. P. 132–140.
20. *Кравец Л.В., Маринушкин В.Н., Смирнов Н.Д.* Исследование характеристик перистой облачности наземным лидаром. В сборнике “Радиационные свойства перистых облаков. Под ред. Фейгельсон Е.М. М.: Наука, 1989. 223 с.
21. *Yang P., Gao B.-C., Baum B.A., Wiscombe W., Hu Y., Nasiri S.L.* Sensitivity of cirrus bidirectional reflectance in MODIS bands to vertical inhomogeneity of ice crystal habits and size distributions // J. Geophys. 2001. V. 106. P. 17267–17291.
22. *Platnick S., King M.D., Ackerman S., Menzel W.P., Baum B.A., Riedi J. et al.* The MODIS cloud products: algorithms and examples from Terra // IEEE Trans Geosci. Remote Sens. 2003. V. 4. P. 459–473.
23. *Winker D.M., Couch R.H., McCormick M.P.* An overview of LITE: NASA’s Lidarinspace Technology Experiment I // Proc. IEEE. 1996. V. 84. P. 164–180.
24. *Winker D.M., Pelon J., McCormick M.P.* The CALIPSO mission: Spaceborne lidar for observation of aerosols and clouds // Proc. SPIE. 2003. V. 4893. P. 1–11.
25. *Baran A.* On the remote sensing and radiative properties of cirrus. All content following this page was uploaded by Anthony J. Baran on 17 May 2014. P. 59–95.
26. *Yang P., Bi L., Baum B.A., Liou K.N., Kattawar G.W., Mishchenko M.I., Cole B.* Spectrally Consistent Scattering, Absorption, and Polarization Properties of Atmospheric Ice Crystals at Wavelengths from 0.2 to 100 pm // J. Atmos. Sci. 2013. V. 70. P. 330–347.
27. *Baran A., Havemann S.* The dependence of retrieved cirrus ice-crystal effective dimension on assumed ice crystal geometry and size-distribution function at solar wavelengths // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2004. V. 130. P. 2153–2167.
28. *Baum B., Yang P., Heymsfield A., Bansemer A., Cole B., Merrelli A., Schmitt C., Wang C.* Ice cloud single-scattering property models with the full phase matrix at wavelengths from 0.2 to 100 mm // J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. 2014. V. 146. P. 123–139.
29. *Петрушин А.Г.* Интенсивность излучения, рассеянного под малыми углами ориентированными ледяными кристаллами // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1987. Т. 23. № 5. С. 546–548.
30. *Журавлева Т.Б.* Имитационное моделирование полей яркости солнечной радиации в присутствии оптически анизотропной кристаллической облачности: алгоритм и результаты тестирования // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 12. P. 937–943.
31. *Токарев И.А., Рыбин И.А., Бусыгин В.П. и др.* Характеристики оптического излучения болидов в условиях облачности // Инженерная физика. 2020. № 7. С. 3–15.
32. *Бусыгин В.П., Краснокутская Л.Д., Кузьмина И.Ю.* Перенос оптического излучения подоблачных молний в космос // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 5. С. 85–93.

Transfer of Laser Pulses Through the Atmosphere into Space in the Presence of Clouds of the Upper and Middle Tiers

V. P. Busygin^{1, *}, A. S. Ginzburg², and I. Yu. Kuzmina^{3, **}

¹*12 CRI Ministry of Defense of the Russian Federation, Vesennyaya str., 2B, Sergiev Posad, Moscow Region, 141307 Russia*

²*Obukhov Institute of Atmospheric Physics Russian Academy of Science, Pyzhevsky lane, 3, Moscow, 119017 Russia*

³*Joint stock Company "Research and production Corporation "Precision Systems and Instruments", Aviamotornaya str., 53, Moscow, 111024 Russia*

**e-mail: adikbu@yandex.ru*

***e-mail: irkuzmina@bk.ru*

Mathematical models of the atmosphere have been developed for a laser wavelength of 0.532 μm , including the optical characteristics of crystalline environment for aggregate structures of ice particles. Calculations of the optical radiation transfer from subnanosecond laser pulses of ground stations to high-orbit and low-orbit spacecraft in the presence of upper and middle tiers clouds are performed. It is shown that the principles of no-demand (one-way) laser ranging can be implemented in the presence of frontal cirrus, cirrus-stratus and cirrus-cumulus clouds, as well as altostratus clouds in the sky with established limitations on the optical thickness.

Keywords: frontal cloudiness, crystalline clouds of the upper and middle tiers, laser ranging, impulse response, Monte Carlo method