

В.С. Шаманаев

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ОКОЛОЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА

Рассмотрена возможность применения орбитальных лидаров для исследования околоземного космического пространства. Оценены оптические характеристики основных светорассеивающих компонентов на высотах 100–500 км от поверхности Земли – молекул и атомов газов, свободных электронов, аэрозолей и космического мусора. На основе уравнений лазерного зондирования и лазерной локации оценены мощности принимаемых сигналов. Показано, что орбитальный лидар, имеющий современные технические параметры, способен уверенно регистрировать сигналы от дисперсных составляющих околоземного пространства на дистанции в сотни метров от космического корабля. Элементы <космического мусора> могут быть обнаружены лидаром на дистанциях от единиц до десятков километров.

Методы исследования атмосферы с помощью лидаров уже достаточно давно используются и в чисто научных, и в прикладных задачах. Более того, лидары разработаны уже и для космических кораблей, и один из них провел к настоящему времени первые эксперименты [1]. Однако объекты исследования здесь – облака и аэрозоли – находятся достаточно близко к поверхности Земли, не далее нескольких десятков километров.

В то же время имеется обширное околоземное пространство, в котором проявляются многочисленные солнечно-земные связи и осуществляется деятельность человека. Спорадическая солнечная активность, регулярное движение терминатора по атмосфере приводят к разнообразным волновым процессам с длинами волн 130–520 км и с вариациями параметров до 10–50% [2]. Классические методы радиофизических исследований позволяют следить только за заряженными частицами, практически не анализируя нейтральные атомы и молекулы. Это же относится и к космической пыли [3]. Поэтому здесь открываются широкие возможности для использования локаторов оптического диапазона, имеющих существенно большие эффективности взаимодействия с указанными частицами.

Кроме того, начинает разрастаться проблема <космического мусора> в околоземном пространстве. Это обломки спутников и ракет-носителей, остатки сгоревшего и несгоревшего топлива, иные отходы деятельности человека в космосе. Металлические частицы размером менее нескольких сантиметров и диэлектрические частицы радиолокаторами не обнаруживаются. Мелкий мусор представляет по массе наибольшее засорение для ближнего космоса [4].

Во всех этих случаях лидар, размещенный либо на стационарной космической платформе, либо на патрулирующем спутнике с переменной орбитой, может оказаться незаменимым инструментом для исследования естественных и антропогенных составляющих околоземного пространства.

Данная работа представляет собой попытку оценить потенциальные возможности подобной лидарной системы на современном техническом уровне. В качестве основного физического явления взято упругое рассеяние света. Оно обладает максимальным сечением оптического взаимодействия, с его использованием получены хорошие технические результаты.

Анализ имеющейся литературы показал, что в ближнем околоземном космосе имеются три основные естественные светорассеивающие субстанции. До высот 500–600 км – это молекулы и в основном атомы главных атмосферных газов, аэрозоли, вернее, космическая пыль, и свободные электроны.

В [5] приведен вертикальный профиль концентрации свободных электронов, синтезированный по нескольким литературным источникам. Там же дано сечение рассеяния фотонов на свободных электронах, равное $3 \cdot 10^{-25}$ см². Для нерелятивистского случая оно не зависит от длины волны оптического излучения.

В табл. 1 представлен рассчитанный по этим данным вертикальный профиль объемного коэффициента рассеяния σ_v . Он имеет максимум на высоте около 300 км над поверхностью Земли. Очевидно, этот средний профиль будет существенно изменяться во время солнечных бурь и иных магнитоэлектрических процессов.

Происхождение, генезис и распределение аэрозолей в верхней атмосфере – ближнем космосе – было проанализировано в [3]. Показано, что выше 140 км движение пылинок может рассматриваться как свободное движение в гравитационном поле Земли, т. е. на высотах более 140 км могут присутствовать лишь первичные космические пылинки всех размеров, влетающие в атмосферу и не испытывавшие еще существенного торможения. Ниже примерно 100 км в атмосфере могут присутствовать лишь полностью потерявшие свою начальную космическую скорость пылинки.

Таблица 1

Вертикальные профили объемных коэффициентов рассеяния на свободных электронах σ_v , на космических аэрозолях σ_a и на молекулярно-атомной смеси σ_m

Высота, км	$\sigma_v, \text{м}^{-1}$	$\sigma_a, \text{м}^{-1}$	$\sigma_m, \text{м}^{-1}$
0	–	–	$1,34 \cdot 10^{-5}$
100	$6,5 \cdot 10^{-18}$	$2 \cdot 10^{-10}$	$3,8 \cdot 10^{-12}$
200	$1,3 \cdot 10^{-17}$	$1 \cdot 10^{-12}$	$4,8 \cdot 10^{-15}$
300	$2,6 \cdot 10^{-17}$	$3 \cdot 10^{-13}$	$1,5 \cdot 10^{-16}$
400	$2,0 \cdot 10^{-17}$	$6 \cdot 10^{-14}$	$1,3 \cdot 10^{-16}$
600	$6,5 \cdot 10^{-18}$	–	$5 \cdot 10^{-19}$

На рис. 1 приведен полученный в [6,7] вертикальный профиль коэффициента рассеяния σ_a . Он построен в пренебрежении молекулярным рассеянием по наблюдениям яркости атмосферы на длинах волн 300–1100 нм во время запусков геофизических ракет. Интересно, что на высотах 40 и 450 км средний радиус пылинок $\bar{r} = 0,2$ мкм, а максимальный $r = 0,5$ мкм на высотах 100–200 км.

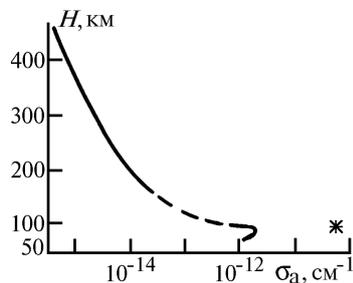


Рис. 1. Вертикальный профиль аэрозольного коэффициента рассеяния $\sigma_a(H)$ по данным [6,7]. Штриховая часть линии – интерполяция. Звездочкой обозначены результаты, пересчитанные по [8]

Авторами [8] на геофизической ракете был запущен нефелометр обратного рассеяния на базе арсенид-галлиевых диодных лазеров. Слои с повышенной светорассеивающей способностью (предположительно аэрозольные) были обнаружены на высотах 90–110, 255–270 и 320–340 км. Для 100-км слоя был измерен коэффициент обратного рассеяния, равный $7 \cdot 10^{-12} \text{см}^{-1} \cdot \text{стер}^{-1}$. Если принять для этого слоя индикатрису обратного рассеяния (лидарное отношение) рэлеевской, равной $0,12 \text{стер}^{-1}$, то здесь $\sigma_a = 5,8 \cdot 10^{-9} \text{м}^{-1}$. Профиль аэрозольного рассеяния по [6], приведенный к длине волны 530 нм, помещен также в табл. 1.

Как отмечалось в [3], зачастую аэрозольное светорассеяние может быть и ниже молекулярного, т.е. это также изменчивая составляющая. Очевидно, большую роль в этом сыграют метеорные потоки, входящие в атмосферу. Относительно крупные метеоры оставляют локальные следы, оптические характеристики которых поддаются расчету [9].

Оценка величины молекулярного рассеяния является наиболее сложной в данной задаче. Действительно, имеется каноническое выражение для объемного коэффициента рассеяния обеспыленного сухого воздуха для излучения с длиной волны λ

$$\sigma_m = \frac{8\pi^3 (n^2 - 1)^2}{3 N \lambda^4}, \quad (1)$$

где N – концентрация молекул; n – показатель преломления воздуха.

На рис. 2 в соответствии со справочником [10] приведены концентрации основных газов в верхней атмосфере. Весьма заметные изменения концентрации происходят в зависимости от времени суток, географической широты, сезона. Для атомного кислорода, например, имеются полугодовые циклы с минимумами зимой и летом и максимумами в равноденствие.

Для атомных газов в силу трудности их получения измерения показателей преломления не производились. Поэтому в качестве оценки принимаем молекулярные значения, т.е. для водорода $n = 1,000138$, для кислорода $1,000272$ и для гелия $1,000035$. Для воздуха принято, что в нормальных условиях $n = 1,000292$.

В формуле (1) при изменении концентрации молекул изменяется и параметр $n^2 - 1$. В монографии [11] на основе соотношения Лорентц–Лоренца обосновано использование выражения

$$\sigma(H) = \sigma(H_0) \frac{\rho(H)}{\rho(H_0)} = \sigma(H_0) \frac{N(H)}{N(H_0)}, \quad (2)$$

где $\rho(H)$ – известное давление воздуха на высоте H . На уровне моря для чистого сухого воздуха $N(H_0) = 2,687 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ [12] и $\sigma(H_0) = 1,34 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$ при $\lambda = 530 \text{ нм}$.

В то же время уже на высоте 200 км, учитывая данные рис. 2, суммарная концентрация молекул уменьшается на 9 порядков. Среднее расстояние между атомами становится гораздо больше длины волны зондирующего излучения, так что кооперативные эффекты существенно ослабевают. Молекулярное рассеяние становится истинно молекулярным, а не рассеянием на флуктуациях плотности, чему прямо соответствует формула (1). По большому счету при этом теряется физический смысл показателя преломления n , и задачу рассеяния света на молекуле и атоме необходимо рассматривать с квантовомеханической точки зрения. Однако в доступной литературе такие сведения отсутствуют, и остается в первом приближении использовать совокупность формул (1) и (2). Рассчитанные таким образом коэффициенты молекулярного рассеяния σ_m также сведены в табл. 1. Заметим, что по всем литературным данным концентрация молекул и σ_m могут испытывать изменения в 50–100% относительно приведенных величин.

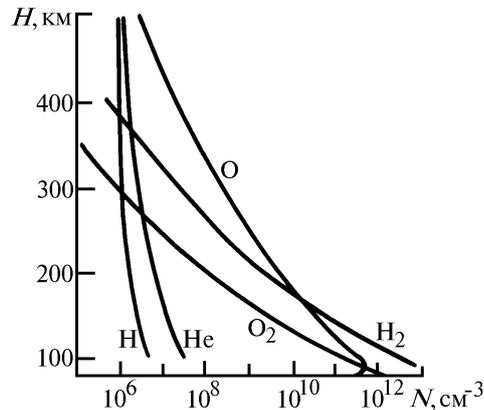


Рис. 2. Вертикальные профили концентрации атмосферных газов $N(H)$ по [10]

Квантовомеханическая оценка была использована М. Гринбергом в монографии [13] на примере свободных радикалов с радиусами порядка 6 \AA . Он показал, что эффективное сечение поглощения по порядку величины равно квадрату диаметра частицы. Поглощение света отдельной малой частицей сопровождается переизлучением энергии на той же частоте со временем жизни частицы в возбужденном состоянии 10^{-9} с . Речь здесь идет фактически об упругом рассеянии. Полученные Гринбергом результаты удовлетворительно соответствуют космогоническим гипотезам.

Однако прямое применение такого подхода к атмосфере дало явно завышенные результаты. Так, при диаметре атома $0,4 \text{ \AA}$ и концентрации атомов по [10] на высоте 100 км коэффициент рассеяния соответствует $1,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$, что даже превосходит приземные данные (см. табл. 1). Поэтому, исходя из общезначимых соображений, в дальнейшие расчеты был заложен классический подход к молекулярному рассеянию.

На основе полученных оценок светорассеивающей способности верхней атмосферы был произведен расчет мощности принимаемого сигнала по уравнению лазерного зондирования, учитывающему космическое базирование лидара. Использование приближения однократного рассеяния здесь не вызывает сомнений.

$$P(r) = P_0 S_0 \eta \rho_0 r^{-2} \beta_\pi \sigma(r), \quad (3)$$

где $P(r)$ – принимаемая мощность с дистанции r ; P_0 – мощность излучения лазера; S_0 – площадь приемного телескопа; η – общий КПД оптического тракта; $\sigma(r)$ – коэффициент рассеяния; β_π – нормированная индикатриса рассеяния в направлении 180° (лидарное отношение); ρ_0 – пространственная протяженность лазерного импульса. В свою очередь, $\rho_0 = c\tau/2$, где c – скорость света, а τ – длительность лазерного импульса.

В расчете были использованы отнюдь не уникальные параметры: $S_0 = 1 \text{ м}^2$; $P_0 = 10^7 \text{ Вт}$; $\eta = 0,5$; $\rho_0 = 3 \text{ м}$, т.е. $\tau = 20 \text{ нс}$. В качестве β_π использовалось во всех случаях рэлеевское значение, равное 0,12. С целью оценки максимальных уровней мощности принимаемого сигнала дистанция r принята равной 0,1 км. Этого достаточно, чтобы преодолеть микроатмосферу, окружающую космическую платформу с лидаром [2]. Результаты расчета по формуле (3) приведены в табл. 2. Вторые столбцы по каждому виду рассеяния указывают количество фотонов, пришедших на фотодетектор в стробе от 100 до 250 м от лидара (т.е. за 1 мкс). Энергия одного фотона равна $3,74 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$. Из анализа приведенных здесь результатов видно, что на небольшом удалении от лидара реальным является зондирование околоземного пространства по рассмотренным компонентам. На высотах 200–400 км, типичных для долговременных орбитальных станций, вполне возможно за несколько вспышек лазера накопить количество фотоотчетов, необходимых для определения параметров атмосферы.

Таблица 2

Мощность сигнала, регистрируемого лидаром из околоспутникового пространства P и количество фотонов p , принимаемых в стробе длительностью 1 мкс

Высота, км	Рассеяние					
	на электронах		на аэрозолях		молекулярно-атомное	
	$P_e, \text{ Вт}$	p_e	$P_a, \text{ Вт}$	p_a	$P_m, \text{ Вт}$	p_m
0	–	–	–	–	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{15}$
100	$1,2 \cdot 10^{-16}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-8}$	$5,8 \cdot 10^{12}$	$6,8 \cdot 10^{-10}$	$1,1 \cdot 10^{11}$
200	$2,3 \cdot 10^{-15}$	$3,8 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-10}$	$2,9 \cdot 10^{10}$	$8,6 \cdot 10^{-13}$	$1,4 \cdot 10^8$
300	$4,6 \cdot 10^{-15}$	$1,3 \cdot 10^6$	$5,4 \cdot 10^{-11}$	$8,7 \cdot 10^9$	$2,7 \cdot 10^{-14}$	$4,3 \cdot 10^6$
400	$3,6 \cdot 10^{-15}$	$5,6 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-11}$	$1,7 \cdot 10^9$	$2,3 \cdot 10^{-15}$	$3,7 \cdot 10^5$
600	$1,2 \cdot 10^{-16}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	–	–	$9 \cdot 10^{-17}$	$1,4 \cdot 10^4$

Интересно, что на высотах 300–400 км рассеяние на свободных электронах сравнимо с молекулярным, а аэрозольное может даже и превосходить его. Конечно, необходимо помнить, что вследствие нестабильности верхней атмосферы величины этих сигналов могут претерпевать изменения до 100%, а аэрозольная составляющая – до 2-х порядков в зависимости от прохождения метеорных потоков. Эта пыль является естественной составляющей <космического мусора>.

Для определения соотношения компонентов рассеяния вполне можно использовать многочастотный лидар, например, на основной, второй и третьей гармониках лазера на гранате с неодимом. Известно, что для молекулярного рассеяния интенсивность обратного рассеяния будет пропорциональна λ^{-4} , для электронного рассеяния она не зависит от длины волны в этом диапазоне. Для зондирования приложимы модельные представления, описываемые точными законами рассеяния Ми.

Здесь намеренно опущен вопрос о фонах, ограничивающих чувствительность метода. Источниками фонов являются звезды, эмиссионное излучение атмосферных газов, рассеянное солнечное излучение. В первом приближении можно принять, что эмиссионные спектры не совпадают с лазерными длинами волн, а поле зрения лидара можно направить в иную сторону, с меньшим фоном. Это никак не повлияет на исследование околоземного пространства.

После задачи зондирования объемной цели, т.е. атмосферы, рассмотрим задачу локации двумерных целей, т.е. крупных частиц <космического мусора>.

В данном случае формирование эхосигнала происходит в соответствии с уравнением лазерной локации, а не зондирования. Следуя работе [14], с учетом некоторых особенностей лидаров по сравнению с радаром, можно получить, что

$$P(r) = \frac{16 P_0 S_0 \eta}{r^4 \Theta_0^2} \sigma_{\text{ц}}, \quad (4)$$

где Θ_0 – угол расхождения лазерного луча на выходе из лидара; $\sigma_{\text{ц}}$ – эффективный поперечник рассеяния лоцируемой цели. Отличительной особенностью от лидарного уравнения является то, что сюда не входит пространственная длительность зондирующего импульса ρ_0 . Угол поля зрения лидара $\Theta \geq \Theta_0$.

Исследования по проблеме космического мусора начались относительно недавно. Тем не менее анализ повреждений спутников и основанные на этом теоретические расчеты показали, что к 1993 г. вблизи Земли на расстояниях до 2000 км находится порядка $14 \cdot 10^6$ некаталогизированных обломков размерами 1 – 15 см (т.е. они не регистрируются наземными радаром). К <космическому мусору> относят частицы с размером более 0,1 мм [4,15,16]. Для иллюстрации можно сообщить, что вероятность столкновения 1 м² сечения космического корабля за 10 лет с частицей размером более 0,1 мм равна 0,020, для частиц более 1 см она равна 0,00032, и более 15 см – 0,000011 [4]. Распределение плотности этих частиц зависит от высоты орбит и углов их наклона.

Известно, что часть <космического мусора> является обломками металла и пластмассы, замерзшими остатками топлива и окислителя, бытовыми отходами деятельности космонавтов. До 60% частиц пока не удалось идентифицировать. Такая неопределенность позволяет в первом приближении моделировать эти обломки ламбертовыми сферами для оценки их отражательной способности и потенциала обнаружения лидара.

Для плоской поверхности ламбертова индикатриса отражения равна $\cos\gamma/\pi$, где γ – угол отклонения от нормали. Интегрируя по поверхности полусферы с коэффициентом отражения q несложно получить, что ее эффективное сечение рассеяния $\sigma_{\text{ц}} = q\pi a^2/8$, где a – диаметр сферы, т.е. оно фактически равно половине ее геометрического сечения.

Оценим дальность обнаружения таких обломков, обратив уравнение (4). За основу оценки порога обнаружения сигнала по одной вспышке лазера возьмем характеристики реального лазерного альтиметра, летающего на отечественных геодезических спутниках [17]. У него при площади приемного телескопа $5,7 \cdot 10^{-2}$ м² порог срабатывания фотоумножителя (кстати, в шаблящем режиме) установлен равным $1,7 \cdot 10^{-8}$ Вт. В пересчете на телескоп площадью 1 м² будет $P_{\text{пор}} = 9,7 \cdot 10^{-10}$ Вт.

В этом случае дальность обнаружения одиночных шаров диаметром 10, 1 и 0,1 см с коэффициентом отражения $q = 0,5$ составит 50, 16 и 5 км. Напомним, что фоновое излучение космоса, попадающее в приемный телескоп лидара, здесь не учитывается.

Реальные обломки космического мусора (<мусорозоль>) могут иметь сложную форму и индикатрису рассеяния, комплексный показатель преломления, переменную концентрацию и т.п. Это может затруднить обнаружение, заставить использовать для локации несколько длин волн, люминесцентный и поляризационный анализ и т.д. Крупным резервом повышения чувствительности является использование когерентных лидаров. Можно предположить, что в будущем лидары, установленные на космическом зонде, будут посылать для обследования ядер комет сквозь их газопылевую оболочку. Во всяком случае первые шаги в этом направлении по зондированию лидаром поверхности Луны и астероидов уже предприняты [18].

Таким образом, орбитальный лидар упругого рассеяния света с реальными техническими характеристиками может позволить исследовать околоземное пространство как с точки зрения газопылевой концентрации верхней атмосферы Земли, так и с точки зрения контроля за негативными результатами человеческой деятельности – <космическим мусором>.

1. Winker D. M., McCormic M. P. Aerosol and Cloud Sensing with the Lidar-in-Space Technology Experiment (LITE). The European Symp. on Satellite Remote Sensing. 26–30 Sept., 1994, Rome, Italy. Abstr. of Pap., 2310–11. P. 23.
2. Лазарев А. И., Коваленок В. В., Авакян С. В. Исследование Земли с пилотируемых космических кораблей. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 400 с.
3. Лебединец В. Н. Аэрозоль в верхней атмосфере и космическая пыль. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 272 с.
4. Nazarenko A. I. Small-Particles Space Debris Simulation. Pap. of <Int. Aerosol Symp.>, Karpov Inst. of Phys. Chemistry, March 21–25, 1994, Moscow, Russia.
5. Меженный С. В. Яркость рассеянного излучения на свободных электронах для высот от 60 до 600 км. <Вопросы оптики верхней атмосферы>. Тр. ИПГ. М.: Гидрометеоздат, 1976. Вып. 22. С. 33–41.
6. Микиров А. Е. // Космические исследования. 1965. Т. III. Вып. 2. С. 284–296.
7. Микиров А. Е. // Геомагнетизм и аэрномия. 1967. Т. 7. С. 748–750.
8. Izawa Y., Nakai S., Yamanaoka C. Laser Radar System Loaded on a Rocket for Measurements of Upper Atmosphere. Proc. of 6th Int. Laser Radar Conf., Sendai, Japan, 1973. P. 177–178.
9. Бегханов М., Курбанмуратов О., Лебединец В. Н. // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. N 11. С. 1176–1185.
10. Атмосфера. Справочник. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 510 с.
11. Мак-Картни Э. Оптика атмосферы. Рассеяние молекулами и частицами. М.: Мир, 1979. 424 с.
12. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 640 с.
13. Гринберг М. Межзвездная пыль. М.: Мир, 1970. 200 с.
14. Степаненко В. Д. Радиолокация в метеорологии. Л.: Гидрометеоздат, 1973. 344 с.
15. Назаренко А. И. // Проблемы загрязнения космоса. Институт астрономии РАН. Космосинформ, 1993.
16. Kessler D. I. Orbital Debris Environment. First European Conf. on Space Debris, Darmstadt, 1993, Germany.
17. Коханенко Г. П., Матвиенко Г. Г., Шаманаев В. С., Грачев Ю. Н., Знаменский И. В. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 7. С. 967–975.
18. Rustan R. L. CLEMENTINE mission. The European Symp. on Satellite Remote Sensing. 26–30 Sept., 1994, Rome, Italy. Abstr. of Papers, 2317–29. P. 121.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
18 ноября 1994 г.

V. S. Shamaev. **Potentialities of Laser Sounding of Circumterrestrial Space.**

An applicability of spaceborne lidars to investigations of circumterrestrial space is treated in the paper. Optical characteristics of such principal light-scattering components as molecules and atoms of gases, free electrons, aerosols and space refuse were estimated for the heights from 100 to 500 km. The estimates of received signals power are obtained based on the laser sounding equations. The spaceborne lidar with up-to-date parameters is shown to be capable to detect with confidence returns from dispersed components of the circumterrestrial space located at the distance of hundreds meters from the spacecraft. Particles of the space refuse are detectable within distances from one to tens kilometers.