

Роль вторичного рассеяния при определении дальности обнаружения лазерного излучения в атмосфере Земли пассивным лидаром

В.И. Григорьевский, Я.А.Тезадов

ФирЭ им.В.А.Котельникова РАН, Московская обл., г.Фрязино, пл.акад.Введенского 1, vig248@ire216.msk.su, vig248@rambler.ru

В работе решена задача определения величины принимаемой рассеянной оптической мощности от сторонних слабобрасходящихся лазерных пучков, распространяющихся в атмосфере Земли, пассивным лазерным локатором (лидаром) в слабозамутненной атмосфере с учетом вторичного рассеяния Рэлея и определен радиус действия лидара для этих условий. В ночных условиях без солнечной засветки радиус действия лидара может составлять более 4500 км при обнаружении пучков с мощностью порядка 100 кВт в диапазоне длин волн ~1600 нм. При наличии солнечной засветки радиус действия уменьшается на порядок. Проведен также расчет зависимости радиуса обнаружения и принимаемой лидаром мощности для длин волн стороннего излучения в диапазонах 1650 нм, 1000 нм и 500 нм. Несмотря на то, что рассеяние обратно пропорционально четвертой степени длины волны света, на больших расстояниях радиус действия лидара уменьшается с уменьшением длины волны стороннего излучения из-за существенно больших потерь от вторичного рэлеевского рассеяния. Динамический диапазон радиуса обнаружения на длине волны 500 нм составляет величину от ~20 км при локации пучков мощностью ~10 Вт до ~200 км при локации мощных пучков ~100 000 Вт, что меньше чем на других длинах волн. Однако, в реальной атмосфере всегда присутствуют частицы дымки (аэрозоли), и практически всегда, кроме молекулярного, есть и аэрозольное рассеяние, которое может ограничивать дальность обнаружения и величину принимаемых сигналов, полученных в рамках представленной модели. Экспериментальные и теоретические данные согласуются между собой в области небольшой величины дальности обнаружения и мощности стороннего пучка, что подтверждает правильность теоретического подхода к решаемой задаче и позволяет экстраполировать результаты на большие мощности пучков.

The paper solved the problem of determining the received scattered optical power from weakly diverging laser beams propagating in the Earth's atmosphere with a passive laser locator (lidar) in a weakly turbid atmosphere taking Rayleigh secondary scattering into account and was determined the lidar action radius for these conditions. At night conditions without solar illumination, the lidar range can be more than 4500 km when detecting beams with a power of about 100 kW in the wavelength range of ~ 1600 nm. In the presence of solar illumination, the range of the lidar is reduced by an order of magnitude. The dependences of the detection radius and the power received by the lidar for the wavelengths of external radiation in the ranges of 1650 nm, 1000 nm, and 500 nm are also calculated. Despite the fact that scattering is inversely proportional to the fourth power of the light wavelength, at large distances the radius of action of the lidar decreases with a decrease in the wavelength of third-party radiation due to significantly large losses from secondary Rayleigh scattering. The dynamic range of the detection radius at a wavelength of 500 nm is from ~ 20 km when locating beams with a power of ~ 10 W to ~ 200 km when locating high-power beams ~ 100 000 W, which is less than at other wavelengths. However, smoke particles (aerosols) are always present in the real atmosphere, and almost always, besides molecular, there is also aerosol scattering, which can limit the detection range considered in this model.

Experimental and theoretical data are consistent with each other in the region of a small magnitude of the detection range and the power of an external beam, which confirms the correctness of the theoretical approach to the problem being solved and allows extrapolating the results to high beam powers.

В связи с появлением мощных лазерных излучателей с выходной мощностью десятки и сотни киловатт в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне длин волн возникает задача обнаружения или использования (например, для связи или синхронизации) этого излучения, распространяющегося в атмосфере Земли. В частности, такие мощные пучки излучения возможно обнаружить пассивными лидарами с высокочувствительными приемниками излучения, например, на основе лавинных фотодиодов [1]. В данной работе было показано, что Рэлеевское рассеяние от инфракрасного слабобрасходящегося луча в слабозамутненной атмосфере может распространяться на значительные расстояния и рассеянное излучение может использоваться, в частности, для связи или синхронизации удаленных пунктов. Была проведена оценка мощности, принимаемой лидаром в пассивном режиме, когда собственный передатчик лидара выключен, а принимается рассеянное излучение от сторонних мощных источников. Оценки были проведены как для ночных условий в отсутствие солнечной засветки так и для условий работы с солнечной засветкой. Было показано, что мощные (~100 кВт) сторонние пучки могут быть обнаружены лидаром вплоть до расстояний более 10 000 км. Однако, при этом не учитывалось вторичное рэлеевское рассеивание при распространении излучения от стороннего пучка до лидара.

Целью данной работы является уточнение чувствительности и радиуса действия пассивного лидара, обнаруживающего мощные сторонние пучки лазерного излучения при учете вторичного рэлеевского рассеивание при распространении рассеянного излучения от стороннего пучка до лидара, а также определение параметров лидара при локации стороннего излучения с различными длинами волн.

Рассматриваемый ниже подход опирается на линейные процессы распространения лазерного излучения в атмосфере, то есть не затрагиваются нелинейные эффекты пробоя, разогрева воздуха и т.д. Однако плотности мощности сторонних лазерных источников таковы, что уже возможно воздействие их на плотные объекты, находящиеся на пути луча. Также, поскольку рэлеевское рассеяние пропорционально именно плотности мощности лазерного излучения, то возможно его использование и для когерентной связи или синхронизации удаленных на значительные расстояния пунктов. Геометрия решаемой задачи локации выглядит следующим образом, рис.1.

Мощность общего рассеяния Рэлея по всем направлениям на длине стороннего пучка L запишется в виде [1]:

$$P_{\text{расс_общ}} = 4\pi R^2 \frac{P_0}{\pi r^2} \left(\frac{9\pi^2 V^2}{\lambda^4 R^2} \right) \pi r^2 L N_{\text{сп}}, \quad (1)$$

здесь $4\pi R^2 \frac{P_0}{\pi r^2} \left(\frac{9\pi^2 V^2}{\lambda^4 R^2} \right)$ - мощность света, рассеиваемая одной молекулой воздуха по всем направлениям в телесном угле 4π , P_0 – мощность стороннего пучка света, $\frac{P_0}{\pi r^2}$ – его интенсивность (плотность мощности), r – средний радиус стороннего пучка света, $\pi r^2 L N_{\text{сп}}$ – общее число рассеивающих молекул на длине L , R – расстояние от лидара до стороннего пучка, V – объем молекулы воздуха (кислорода, азота), λ - длина волны

излучения, $N_{cp} = 0.335N$ - среднее по высоте число Лошмидта в столбе воздуха в единице объема, определяемое из барометрической формулы:

$$N_{cp} = \frac{1}{25} \int_0^{25} N \exp(-z/8.9) dz = 0.335N . \quad (2)$$

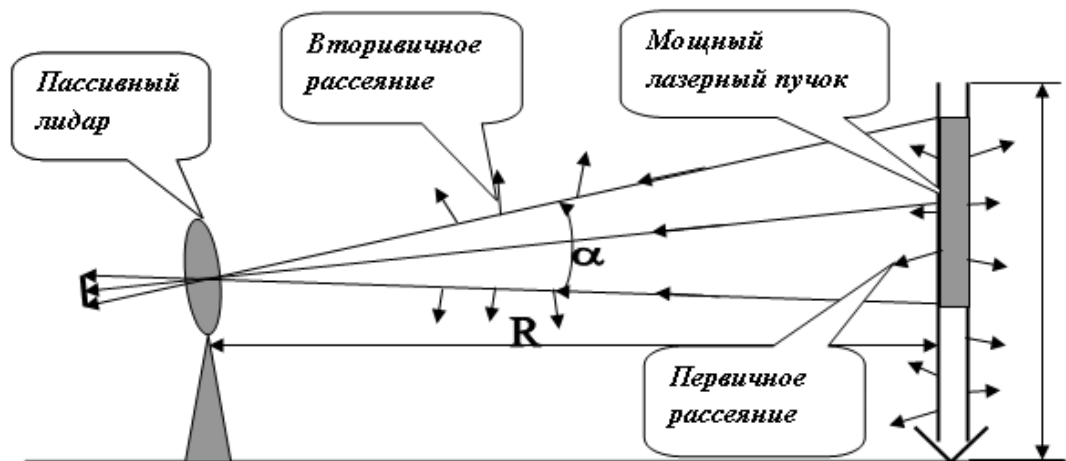


Рис.1 – Геометрия задачи пассивной локации пучка лазерного излучения с учетом вторичного рассеяния Рэлея на пути от стороннего пучка до лидара

Эффективный слой атмосферы с заметным давлением, по которому ведется интегрирование в (2), составляет величину $L \sim 25$ км, а число Лошмидта у поверхности Земли равно $N = 2.68 \cdot 10^{25} \text{ 1/м}^3$. В формуле (1) сделано следующее допущение: индикатриса рассеяния [2] одиночной молекулы для закона Рэлея изотропна и пропорциональна величине, стоящей в круглых скобках формулы (1). Интерпретация данной формулы заключается в суммировании рассеянных величин мощности света от всех молекул воздуха, находящихся на пути пучка. Из этой формулы также видно, что в данном приближении результат расчета не зависит от радиуса слаборасходящегося пучка r и радиуса наблюдения R , поскольку сокращаются величины πr^2 и R^2 в числителе и знаменателе формулы. В поле зрения лидара α попадает лишь часть рассеянной мощности от всего стороннего пучка протяженностью L . В [1] было показано, что часть мощности $P_{\text{лид}}$, принимаемая лидаром в отсутствие солнечной засветки, записывается в виде:

$$P_{\text{лид}} = \alpha \pi A^2 P_0 (9\pi^2 V^2 / \lambda^4) N_{cp} / R , \quad (3)$$

здесь α - плоский угол поля зрения лидара, A – радиус его приемного объектива. При больших радиусах обнаружения R необходимо учитывать потери за счет вторичного рассеяния между лидаром и сторонним пучком. При оценке этих потерь в качестве среднего по высоте коэффициента рассеяния k правомерно принять значение правой части формулы (1) без множителя P_0 , полагая $L=1$ км, то есть:

$$k \approx 4\pi \left(\frac{9\pi^2 V^2}{\lambda^4} \right) N_{cp} \quad (4)$$

и это значение в рассматриваемом случае равно $k = 4 \cdot 10^{-4}$ 1/км. Таким образом, мощность $P^1_{\text{лид}}$, попадающая в лидар с учетом вторичного рассеяния, запишется согласно закону Бугера в виде:

$$P^1_{\text{лид}} = \alpha \pi A^2 P_0 (9\pi^2 V^2 / \lambda^4) N_{\text{сп}} / R \cdot (\exp(-kR)) \quad (5)$$

На рис.2. изображена зависимость $P^1_{\text{лид}}$, вычисленная по формуле (5), от величины P_0 при радиусе обзора $R=20$ км, а также зависимость радиуса обзора R от P_0 при принимаемой лидаром мощности $3.2 \cdot 10^{-13}$ Вт. В расчетах было принято, что радиус молекулы воздуха ~ 0.16 нм, длина волны излучения $\lambda \sim 1650$ нм, $\alpha = 0.004$, $A = 0.25$ м. Из графика видно, что при радиусе обзора 20 км мощность излучения ~ 60 Вт можно обнаружить современными высокочувствительными фотоприемниками (например, чувствительными лавинными фотодиодами типа IAG) с порогом обнаружения (noise equivalent power NEP) $\sim 3.2 \cdot 10^{-14}$ Вт/(Гц)^{1/2} в полосе частот 1 Гц. На том же рисунке (правая шкала) приведена зависимость радиуса обзора R от P_0 при лоцируемой мощности в ~ 10 раз больше чем порог обнаружения, то есть при мощности $\sim 3,2 \cdot 10^{-13}$ Вт (сигнал/шум ~ 10). Видно, что вид зависимости радиуса обзора отклоняется от прямой линии при больших R за счет потерь излучения от вторичного рассеяния и это значение R может достигать величины ~ 4700 км при лоцируемой мощности ~ 100000 Вт. При экспериментальном определении радиуса обнаружения рассеянного излучения в дневных условиях на небольших расстояниях оказалось, что он меньше примерно на порядок, чем предсказывают теоретические вычисления. Так, на рис.2 видно, что при мощности стороннего пучка 2 Вт расстояние обнаружения должно составлять ~ 300 метров, однако в поставленном в дневных условиях эксперименте, выполненном с геометрией по рисунку 1 для слаборасходящегося стороннего пучка, оно составило ~ 30 м. Было сделано предположение, что это несовпадение связано с влиянием солнечной засветки на фотоприемник. Этот фактор уменьшает соотношение сигнал/шум а, следовательно, и радиус обзора. С учетом солнечной засветки, как показано в [1], дальность действия и принимаемая мощность уменьшается на порядок. При этом дальность обнаружения пучка мощностью 100 кВт составит ~ 470 км для длины волны стороннего пучка 1650 нм.

Как видно из формулы (5) принимаемая лидаром мощность обратно пропорциональна четвертой степени длины волны детектируемого излучения. На первый взгляд, параметры лидара с укорочением длины волны улучшаются за счет большей величины первичного рассеяния, однако из-за вторичного рассеяния на трассе измерений это положение становится неочевидным. На рис.3 приведены характеристики принимаемой лидаром мощности $P^1_{\text{лид}}$, рассчитанные по формуле (5) для трех длин волн 1650 нм, 1000 нм и 500 нм для расстояния $R=20$ км, а на рис.4 приведена та же мощность для $R=200$ км для ночных условий.

Из рисунка видно, что для короткой трассы в 20 км мощность стороннего излучения, принимаемая лидаром, с уменьшением длины волны растет и величина мощности порядка 60 Вт может быть обнаружена при соотношении сигнал/шум более 10 ($P^1_{\text{лид}} = 3.2 \cdot 10^{-13}$ Вт) для всех трех длин волн, причем, чем короче длина волны, тем больше соотношение сигнал/шум. Совсем другая картина наблюдается при расстояниях локации 200 км, рис.4. Здесь уже мощность стороннего излучения порядка 60 Вт нельзя обнаружить с соотношением сигнал/шум = 10 ни для одной из указанных длин волн. Наихудшая картина наблюдается для $\lambda=500$ нм (видимая область спектра). В этой области возможно обнаружение только очень мощных пучков (более 60000 Вт) в ночных условиях. Наилучший результат получается для $\lambda=1000$ нм. В этой области спектра возможно обнаружение пучков с мощностью ~ 150 Вт. На рис.5 представлены

результаты расчета радиуса обнаружения лидара для указанных длин волн в ночных условиях.

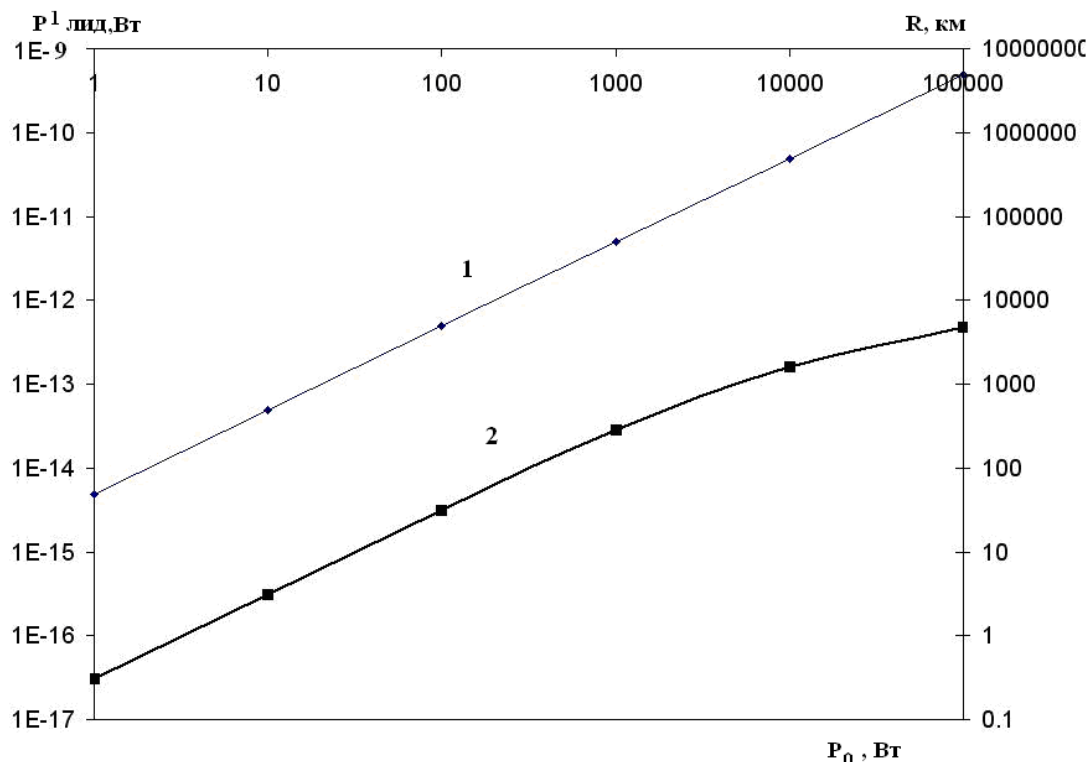


Рис.2 – 1-зависимость рассеянной мощности $P^1_{\text{лид}}$, принимаемой пассивным лидаром, от величины мощности стороннего пучка P_0 (левая шкала), 2 - зависимость радиуса обзора R от P_0 при принимаемой мощности $3.2 \cdot 10^{-13}$ Вт (правая шкала), длина волны света 1650 нм, солнечная засветка отсутствует

Из рисунка видно, что вторичное рассеяние существенно уменьшает радиус обнаружения лидара. Так, если эти потери не учитываются (пунктирная прямая 4 на рис.5), то радиус обнаружения в ночных условиях для длины волны $\lambda=1650$ нм для сторонних пучков мощностью 100 000 Вт составляет более ~ 20 000 км, а при учете потерь от вторичного рассеяния – всего ~ 4 700 км. Для зеленой области спектра динамический диапазон радиуса обнаружения оказывается наименьшим: \sim от 20 км для сравнительно маломощных пучков 1-10 Вт до ~ 200 км для пучков большой мощности ~ 100 000 Вт. Для дневных условий без использования интерференционного фильтра в фотоприемном тракте лидара радиус обнаружения снижается еще на порядок. Если известна заранее длина волны стороннего излучения, то применение интерференционного фильтра с полосой пропускания 1-10 нм может почти полностью устранить влияние солнечной засветки, а характеристики лидара при этом сравнимы с характеристиками, полученными для ночных условий. Однако, необходимо отметить, что в реальной атмосфере всегда присутствуют частицы дымки (аэрозоли), и практически всегда, кроме молекулярного, есть и аэрозольное рассеяние, которое может ограничить дальность обнаружения для рассматриваемой модели. Действительно, в показателе экспоненты формулы (5) в случае наличия и аэрозольного рассеяния добавляется слагаемое с соответствующим коэффициентом рассеяния, что уменьшит принимаемую лидаром мощность, несмотря на более сильное первичное рассеяние стороннего пучка при наличии аэрозоля. Кроме того, наличие очень сильной дымки или тумана делают представленные расчеты недостоверными. В этом случае требуется расчет, учитывающий, как аэрозольное, так и рэлеевское рассеяние.

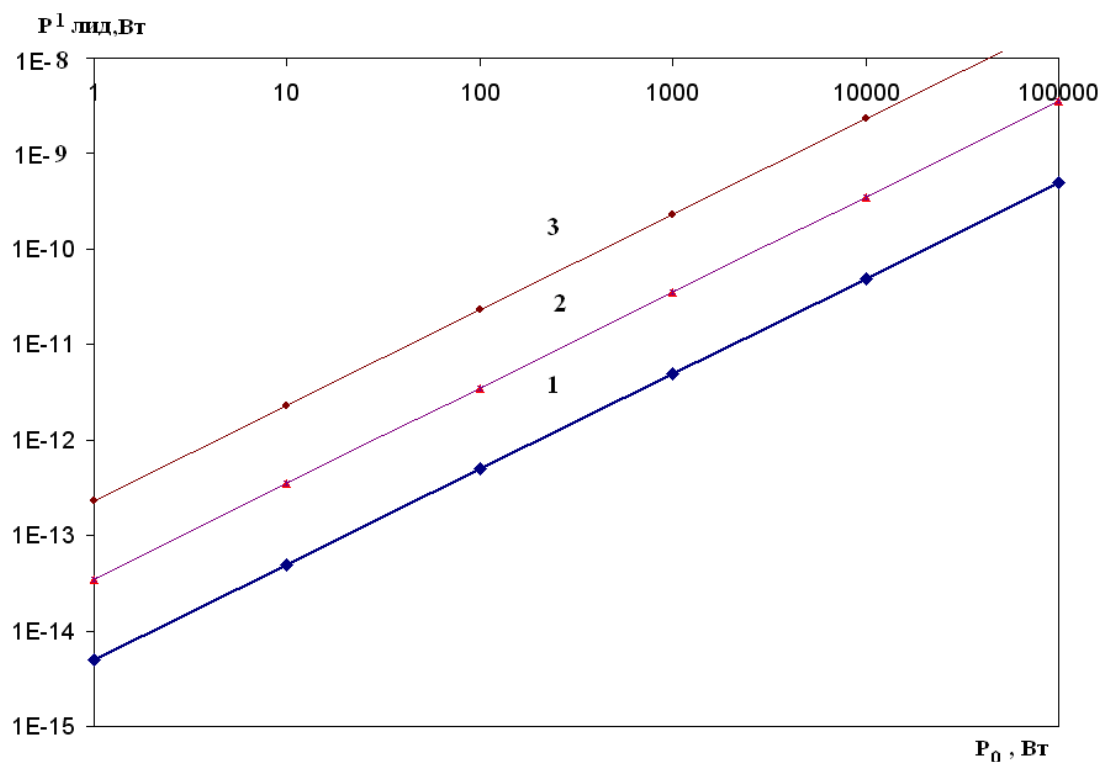


Рис.3 – Зависимость принимаемой лидаром мощности $P^1_{\text{лид}}$ от мощности стороннего пучка P_0 при расстоянии локации 20 км для трех длин волн: 1 - $\lambda=1650$ нм, 2 - $\lambda=1000$ нм, 3 - $\lambda=500$ нм в ночных условиях

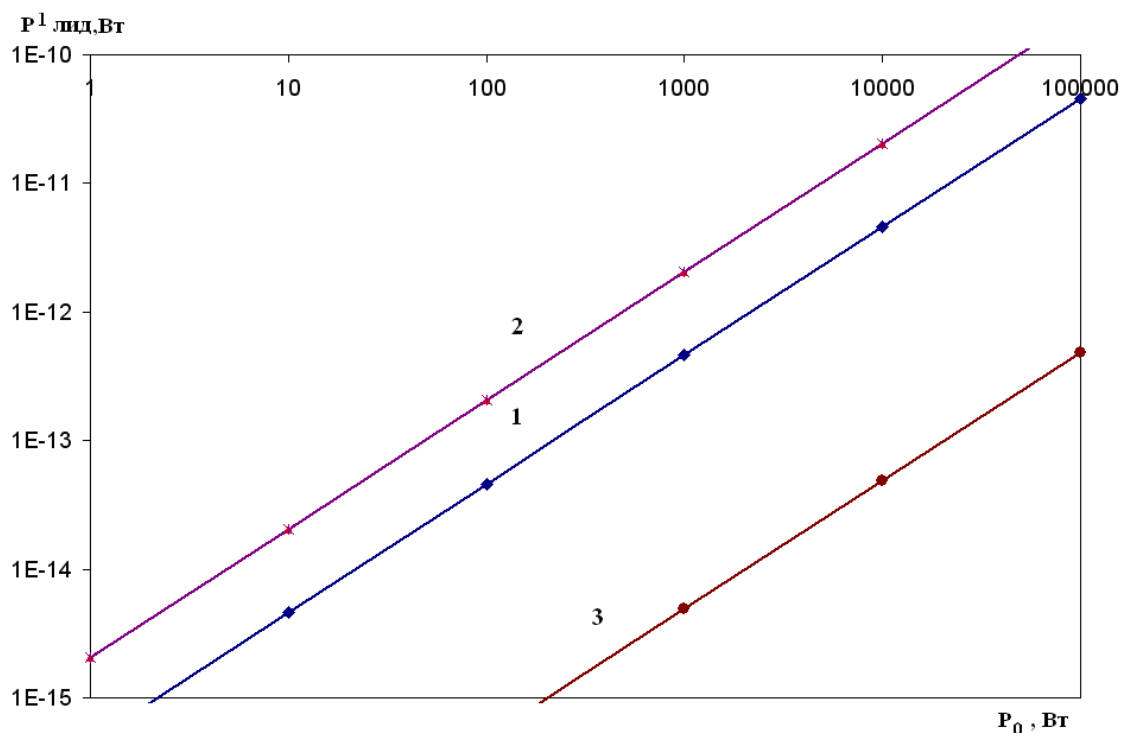


Рис.4 – Зависимость принимаемой лидаром мощности $P^1_{\text{лид}}$ от мощности стороннего пучка P_0 при расстоянии локации 200 км для трех длин волн: 1 - $\lambda=1650$ нм, 2 - $\lambda=1000$ нм, 3 - $\lambda=500$ нм в ночных условиях

Таким образом, проведенный анализ показывает, что для более адекватного определения параметров лидара: принимаемой мощности и радиуса обнаружения необходимо учитывать потери излучения от вторичного рассеяния на пути от стороннего пучка до лидара. Пассивный лидар может обнаруживать такое излучение в слабозамутненной ночной атмосфере в радиусе обзора $\sim 1-5000$ км в зависимости от его мощности на длине волны 1650 нм. В дневных условиях с солнечной засветкой расстояние обнаружения уменьшается примерно на порядок. На более коротких длинах волн характеристики лидара резко ухудшаются при больших расстояниях локации из-за вторичного рассеяния. На длине волны 500 нм радиус обнаружения лидара не превышает ~ 200 км для лоцируемых мощностей 100 кВт. При известной длине волны излучения, возможно применение оптического узкополосного фильтра, который может снизить влияние солнечной засветки до пренебрежимо малой величины, однако потери от вторичного рассеяния неустранимы. Приведенные вычисления показывают также, что возможно не только обнаружение стороннего излучения, но и загоризонтная оптическая связь, основанная на рассеянии Релея между удаленными на значительные расстояния пунктами, не находящимися в зоне прямой видимости. Представленные расчеты перестают работать в случае наличия сильной дымки и тумана. В этом случае необходимо принимать во внимание оба вида рассеяния.

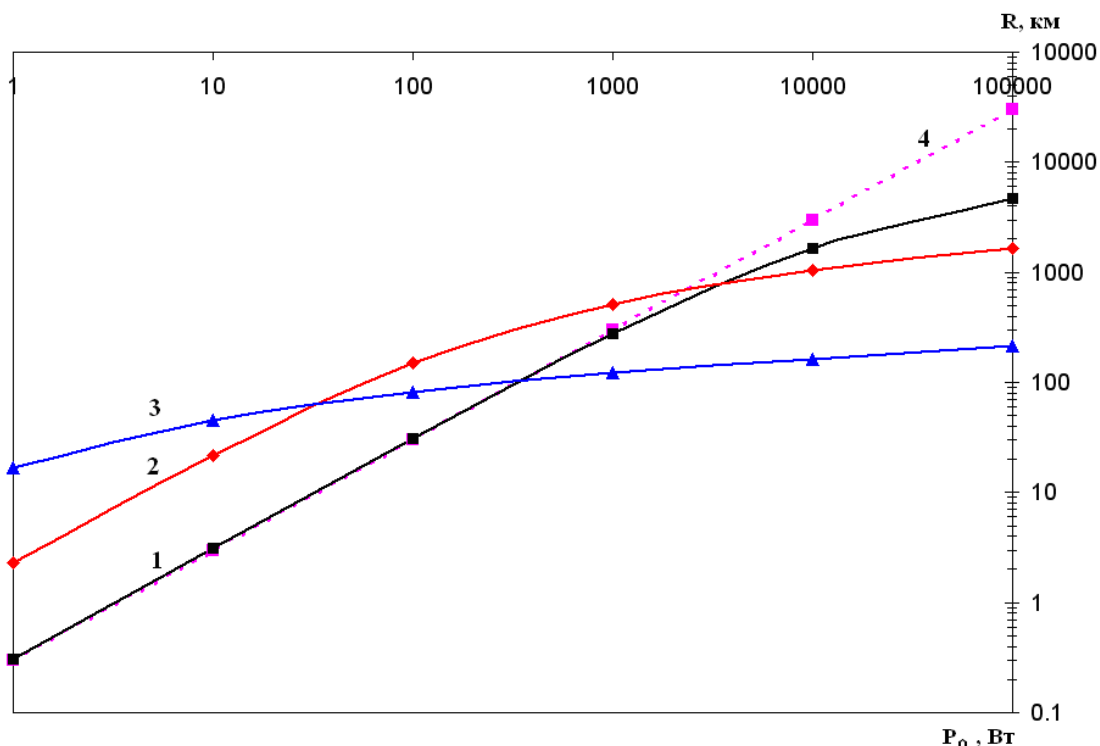


Рис.5 – Радиус обнаружения R лидара от мощности стороннего пучка P_0 с учетом потерь от вторичного рассеяния в ночных условиях для трех длин волн: 1 - $\lambda=1650$ нм, 2 - $\lambda=1000$ нм, 3 - $\lambda=500$ нм, 4 - радиус обнаружения для $\lambda=1650$ нм без учета потерь от вторичного рассеяния

Литература

1. Григорьевский В.И.. Обнаружение инфракрасного лазерного излучения по его рэлеевскому рассеянию в атмосфере Земли. // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2018. N11. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/nov18/12/text.pdf>.
2. Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Основы теоретической атмосферной оптики. –СПб.: С-Петербургский университет, 2007. -152 с.