

УДК 621.375

## Оценка дальности обнаружения систем лазерной локации УФ спектрального диапазона

Городничев В. А.<sup>1,\*</sup>, Пашенина О. Е.<sup>1</sup>,  
Белов М. Л.<sup>1</sup>, Готальская О. В.<sup>1</sup>,  
Кувшинов А. В.<sup>1</sup>

\* [gorod@bmstu.ru](mailto:gorod@bmstu.ru)

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

---

Статья посвящена сравнительному анализу дальности обнаружения лазерного локатора в ультрафиолетовом и видимом спектральных диапазонах. Показано, что для обеспечения в земной атмосфере максимальной дальности обнаружения систем лазерной локации наиболее оптимальным является видимый спектральный диапазон. В ультрафиолетовом спектральном диапазоне дальность локации уменьшается из-за увеличения ослабления лазерного излучения в земной атмосфере. При требовании работы на безопасной для глаз длине волны лазерного излучения эффективная работа систем лазерной локации может быть обеспечена в ультрафиолетовом спектральном диапазоне на длине волны 0,355 нм.

**Ключевые слова:** лазерная локация, ультрафиолетовый диапазон, видимый диапазон, дальность локации

---

### Введение

На сегодняшний день практически все существующие лазерные системы локации и видения (за редким исключением, связанным со спецификой конкретных задач) работают в видимом, ближнем или среднем инфракрасных диапазонах длин волн [1-5].

В последнее время появился интерес к системам, работающим в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне длин волн [6], которые используют другую спектральную информацию (коэффициенты отражения или излучения в УФ диапазоне) об объектах локации, чем лазерные системы в видимом, ближнем или среднем инфракрасных диапазонах.

При этом вопрос заключается не только в получении дополнительной (в другом спектральном диапазоне) информации об объектах локации. Очень важным является и вопрос о безопасности (прежде всего для глаз) используемых лазерных систем [5,7].

Использование лазерных приборов всегда связано с определенной опасностью для человека [8]. Основное вредное воздействие лазерное излучение оказывает на сетчатку глаза, причем хрусталик (и глазное яблоко), действуя как дополнительная фокусирующая оптика, существенно повышает концентрацию энергии на сетчатке. Диапазон длин волн

вредного воздействия на сетчатку глаза составляет от 0,38 до 1,4 мкм. Основное воздействие при импульсном излучении оказывает тепловое разрушение сетчатки. Длительное воздействие излучения на сетчатку глаза приводит, в основном, к фотохимическим процессам ее разрушения.

Лазерное излучение с длинами волн 0,18 – 0,38 мкм и свыше 1,4 мкм воздействует на передние среды глаза и является более безопасным, чем лазерное излучение с длинами волн 0,38 – 1,4 мкм [8].

Дополнительным преимуществом УФ области является то, что здесь резко уменьшается фоновое излучение (рисунок 1).

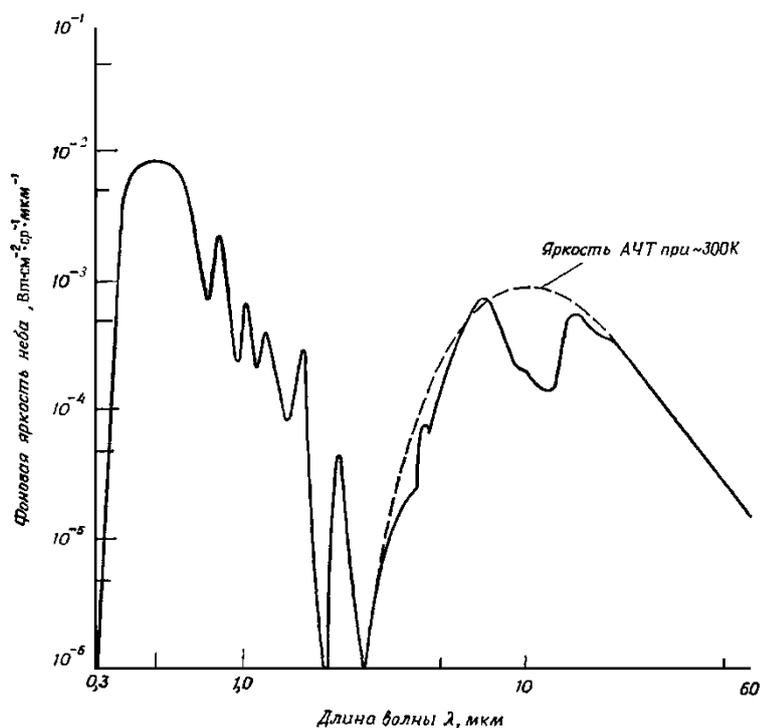


Рисунок 1 - Спектральная зависимость яркости безоблачного неба [9]

На рисунке 1 показана спектральная зависимость яркости безоблачного неба (создаваемая рассеянной в атмосфере солнечной радиацией) на уровне моря для зенитного угла Солнца  $45^{\circ}$  при большой метеорологической дальности видимости. Из рисунка видно, что в ультрафиолетовом диапазоне яркость фонового излучения резко падает. Причиной этого является поглощение ультрафиолетового излучения озоновым слоем Земли.

Несмотря на сильное поглощение атмосферным озоном в ультрафиолетовой области спектра, эта область все же представляет интерес для лазерных систем локации и видения.

Дело в том, что поглощение атмосферным озоном ультрафиолетового излучения происходит в основном в верхних слоях атмосферы (рисунок 2).

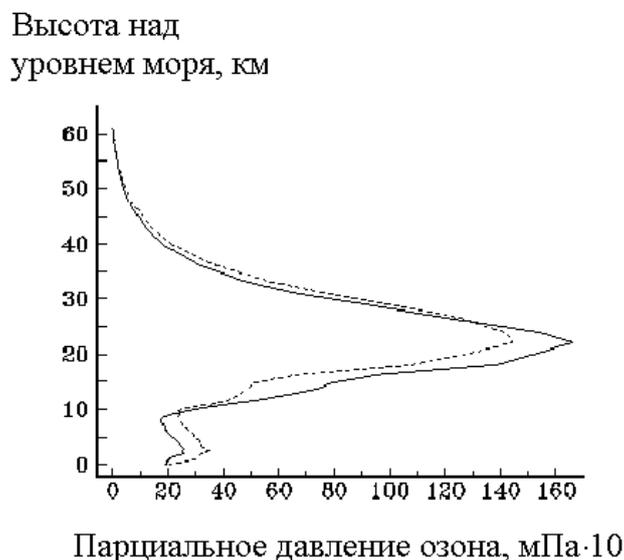


Рисунок 2 – Высотное распределение атмосферного озона [10]

Как видно из рисунка 2, в тропосфере (где работает большинство лазерных систем локации и видения) концентрация озона мала, и здесь (до высот порядка 16 км) находится всего около 8 % общего содержания озона в атмосфере [11].

Таким образом, в тропосфере содержание озона не велико, и здесь возможна практическая реализация лазерных систем локации и видения УФ диапазона.

Поэтому актуальными являются работы посвященные анализу возможностей лазерных систем локации, работающих в УФ диапазоне.

Данная статья посвящена оценке дальности обнаружения систем лазерной локации УФ спектрального диапазона.

## 1. Постановка задачи

Дальность лазерной локации можно оценить из условия равенства (для предельной дальности локации) мощности полезного лазерного локационного сигнала (приходящего на приемник) и пороговой мощности приемника локатора.

Наиболее используемой в теории лазерной локации моделью объекта локации, является плоский ламбертовский отражатель.

Мощность  $P(z)$  лазерного локационного сигнала в прозрачной атмосфере от плоского ламбертовского отражателя с эффективным размером  $r_o$  определяется выражением [5]

$$P(t) \cong P_i \frac{\tau_{\text{л}} c L C}{2} \left\{ 1 - \Phi \left[ C_o \frac{z^{1/2}}{2} - \frac{2t'}{\tau_{\text{л}}} \right] \right\} \exp \left\{ C_o^2 \frac{z}{4} - t' C_o L c \right\}, \quad (1)$$

где

$$P_i = \frac{a_t a_r A}{L^4 C_o}; \quad C_o = C_t + C_r + \frac{1}{r_o^2}; \quad z = 0,25 L^2 c^2 \tau_{\text{л}}^2; \quad t' = t - \frac{2L}{c};$$

$P_i$  - мощность, регистрируемая приемником при непрерывном облучении ламбертовского отражателя;

$A$  - коэффициент отражения (альбедо) ламбертовского отражателя;

$a_{t,r}, C_{t,r}$  - величины, зависящие от параметров источника и приемника лазерного локатора;

$c$  - скорость света;

$\tau_{\text{л}}$  - длительность импульса лазерного источника;

$L$  - расстояние от лазерного локатора до объекта локации;

$\Phi(x)$  - интеграл Френеля.

Формула (1) получена для гауссовской формы импульса лазерного источника:

$$f(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp \left\{ -\frac{4(t')^2}{\tau_{\text{л}}^2} \right\}.$$

Из (1) хорошо видно, что при локации ламбертовского отражателя излучаемый источником импульс гауссовской формы искажается и описывается сложной функцией, содержащей интеграл Френеля (это связано с ограниченным размером отражателя).

Если искажением формы локационного импульса можно пренебречь (это можно сделать, когда протяженность импульса источника  $c\tau_{\text{л}}$  много больше величины  $\frac{R_i^2}{L}$ , где

$R_i$  - размер освещенного лазерного пятна на поверхности), то форма локационного импульса становится гауссовой, а его длительность остается равной длительности импульса источника  $\tau_{\text{л}}$ . Тогда выражение (1) для мощности лазерного локационного сигнала при импульсной локации ламбертовского отражателя принимает вид

$$P(t) \cong P_i f(t). \quad (2)$$

Зависимость величины лазерного локационного сигнала  $P_i$  от расстояния  $L$  до отражателя имеет принципиально разный характер при большом и малом размере отражателя [5]. Если эффективный размер отражателя  $r_o$  много больше размера лазерного пятна подсвета и поля обзора приемника в плоскости отражателя, то формула для мощности  $P_i$  лазерного локационного сигнала имеет вид [5]

$$P_i = \frac{b_t b_r A}{L^2 (\alpha_t^{-2} + \alpha_r^{-2})}, \quad (3)$$

где

$\alpha_t, \alpha_r$  - поле зрения приемной оптической системы и угол расходимости излучения источника, соответственно.

Величины  $b_{t,r}$  в общем случае сложным образом зависят от параметров источника и приемника лазерного локатора. Однако в некоторых частных случаях для них могут быть получены простые соотношения. Например, для локации в прозрачной аэрозольной атмосфере величины  $a_{t,r}$  определяются выражениями [5]

$$b_t = \frac{P_o K_t T_t}{\pi \alpha_t^2}, \quad b_r = \pi r_r^2 K_r T_r,$$

где

$P_o$  – мощность излучения лазерного источника;

$r_r$  – радиус приемного объектива;

$K_t, K_r$  – коэффициенты пропускания оптических систем передающего и приемного каналов лидара;

$T_t, T_r$  коэффициенты пропускания атмосферы на трассе «лазерный локатор – объект локации» и «объект локации - лазерный локатор».

На горизонтальной трассе в однородной атмосфере для моностатической локации имеем

$$T_t = T_r = \exp\{-L(\varepsilon + k)\},$$

$\varepsilon$  – показатель аэрозольного ослабления атмосферы;

$k$  – показатель поглощения атмосферными газами (озоном в УФ диапазоне).

Прием лазерного локационного сигнала всегда производится на фоне шумов, которые ограничивают потенциальные возможности лазерного локатора. В качестве фотодетектора в лазерных локационных системах часто выбирается фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), т.к. он обладает большой чувствительностью и небольшими собственными шумами.

Пороговая мощность ФЭУ при наличии фонового излучения определяется формулой [2]

$$P_{\text{пд}} = \frac{\mu [2e(I_t + I_b)(1 + B)\Delta f]^2}{S_k}, \quad (4)$$

где

$\mu$  - отношение сигнал/шум;

$e=1.6 \cdot 10^{-19}$  [А·с] – заряд электрона;  $(I+B) \cong 2.5$ ;

$\Delta f$  – эффективная полоса частот фотоприемного устройства;

$S_k$  – спектральная чувствительность фотокатода ФЭУ;

$I_t$  – темновой ток фотокатода;

$I_b$  - среднее значение тока, обусловленного фоновой засветкой.

Для приемника лидара с узким полем зрения и узкополосным спектральным фильтром выражение для  $I_b$  имеет вид [5]

$$I_b = K_r L_b S_r (\pi \alpha_r^2) S_k \Delta \lambda, \quad (5)$$

где

$L_b$  - спектральная яркость фонового излучения;

$S_r$  - площадь приемного объектива;

$\pi \alpha_r^2$  - телесный угол поля зрения приемной оптической системы;

$\Delta \lambda$  - полоса пропускания спектрального фильтра.

Коэффициент пропускания оптической системы приемного канала определяется выражением  $K_r = K_o K_f$ , где  $K_o$  – коэффициент пропускания оптической системы без спектрального фильтра;  $K_f$  – коэффициент пропускания спектрального фильтра.

Основным источником фонового излучения в УФ, видимой и ближней инфракрасной областях спектра является солнечное излучение, рассеянное земной атмосферой [5].

При высокой прозрачности атмосферы ( $\tau_o \leq 0,2$ ) результаты близкие к реальным, могут быть получены в аналитическом виде для плоскопараллельной модели атмосферы в приближении однократного рассеяния. Выражение для яркости  $L_b$  фонового солнечного излучения, приходящего на приемник, зависит от геометрической схемы зондирования. В частном случае зондирования в горизонтальном направлении величина  $L_b$  равна [5]

$$L_b = 0,25 \lambda_s S_\lambda \chi(\gamma) \frac{\cos \theta_o}{\cos \theta - \cos \theta_o} \left\{ \exp\left[-\frac{\tau_o - \tau}{\cos \theta}\right] - \exp\left[-\frac{\tau_o - \tau}{\cos \theta_o}\right] \right\}, \quad (6)$$

где

$$\cos \gamma = \cos \theta \cos \theta_o + \sin \theta \sin \theta_o \cos(\varphi - \varphi_o);$$

$\lambda_s$  - отношение показателя рассеяния аэрозольной земной атмосферы к показателю ослабления;

$\pi S_\lambda$  - спектральная солнечная постоянная на длине волны  $\lambda$  (величина  $\pi S_\lambda$  равна спектральной освещенности площадки, перпендикулярной солнечному излучению, на верхней границе атмосферы);

$\tau_o, \tau$  - оптическая толщина всей земной атмосферы и оптическая толщина земной атмосферы между подстилающей поверхностью и приемником (в вертикальном направлении);

$\theta, \varphi$  - зенитный угол и азимут направления наблюдения;

$\theta_o, \varphi_o = 0$  - зенитный угол и азимут Солнца;

$\chi(\gamma)$  - индикатриса рассеяния атмосферы;

$\gamma$  - угол рассеяния.

Ниже проводится сравнительный анализ дальности обнаружения лазерного локатора, работающего на длинах волн 0,266, 0,308, 0,355 мкм (УФ диапазон) и 0,532 мкм (видимый диапазон).

## 2. Математическое моделирование

В работе проводилась оценка дальности обнаружения лазерного локатора для следующих длин волн излучения лазерных источников:

- УФ диапазон: 0,266 мкм (четвертая гармоника лазера на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом), 0,308 мкм (эксимерный лазер на ХеСl), 0,355 мкм (третья гармоника лазера на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом);

- видимый диапазон: 0,532 мкм (вторая гармоника лазера на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом).

Параметры источников и приемников излучения и оптические характеристики атмосферы, используемые в работе, приведены ниже в таблицах 1-5.

Таблица 1 Характеристики ФЭУ для разных длин волн [12]

$\lambda$ , мкм	0,266	0,308	0,355	0,532
Спектральная чувствительность, мА/Вт	30	70	70	75
Темновой ток, А	$0,8 \cdot 10^{-15}$	$10^{-16}$	$10^{-16}$	$3 \cdot 10^{-15}$

Таблица 2 Показатели аэрозольного ослабления атмосферы [5]

$\lambda$ , мкм	0,266	0,308	0,355	0,532
Показатель ослабления, $\text{м}^{-1}$	$9,77 \cdot 10^{-4}$	$8,12 \cdot 10^{-4}$	$6,79 \cdot 10^{-4}$	$4,1 \cdot 10^{-4}$

Таблица 3 Суммарный показатель ослабления из-за поглощения озоном и молекулярного рассеяния [13]

$\lambda$ , мкм	0,266	0,308	0,355	0,532
Суммарный показатель ослабления, $\text{м}^{-1}$	$10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$0,2 \cdot 10^{-3}$	$1,39 \cdot 10^{-5}$

**Таблица 4** Оптическая толща земной атмосферы [5]

$\lambda$ , мкм	0,266	0,308	0,355	0,532
Оптическая толща, отн.ед.	8,39	3,6	0,92	0,41

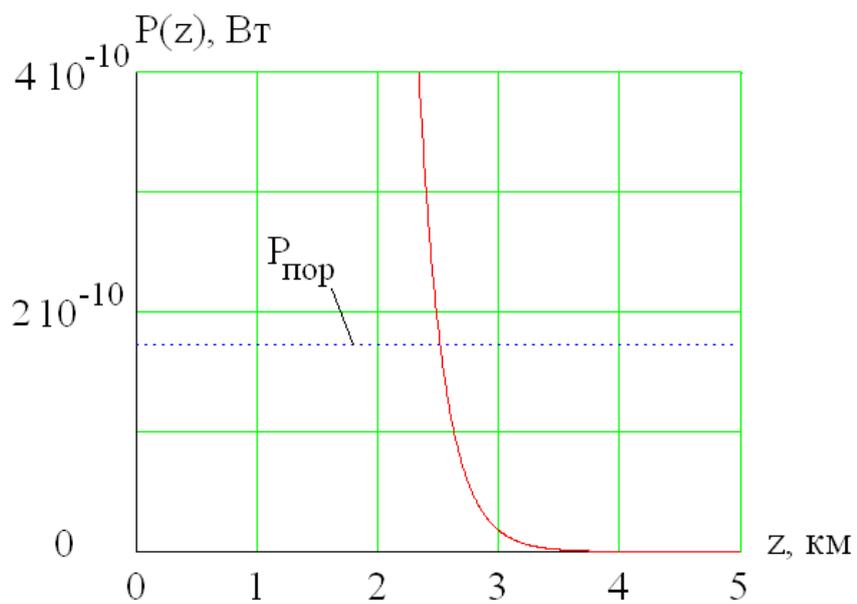
**Таблица 5** Спектральная солнечная постоянная [5]

$\lambda$ , мкм	0,266	0,308	0,355	0,532
Спектральная солнечная постоянная, Вт/см <sup>2</sup> мкм	0,021	0,063	0,116	0,195

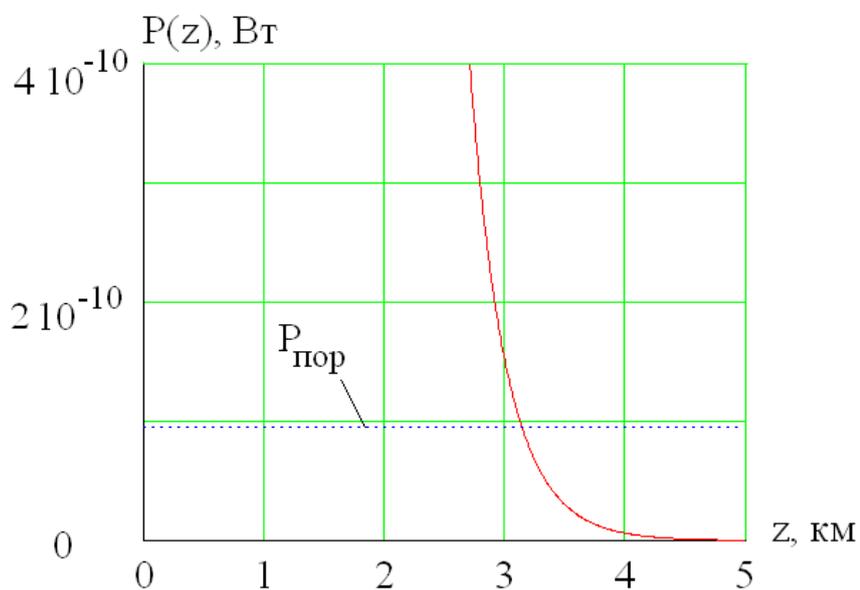
Из Таблиц 1-5 хорошо видно сильная спектральная зависимость приведенных в них величин. Расчеты проводились для горизонтальной трассы зондирования при метеорологической дальности видимости 10 км, безоблачной атмосфере и зенитном угле Солнца  $45^\circ$ . Энергия в импульсе для всех лазеров задавалась равной 10 мДж, а длительность импульса лазера – 10 нс. Угол расходимости излучения лазерного локатора и поле зрения приемной оптической системы полагались равными, соответственно, 1 мрад и 2 мрад, а коэффициенты пропускания передающей и приемной оптических систем – 0,8 и 0,28. Диаметр приемного объектива и ширина спектрального фильтра считались равными 0,1 м и 1 нм, а отношение сигнал/шум – 10. Альbedo поверхности ламбертовского отражателя принималось равным 0,1 для всех длин волн локации (альbedo поверхности не сильно зависит от длины волны [14]).

При расчете по формуле (4) для УФ диапазона оптические толщи  $\tau_o$ ,  $\tau$  состоят из суммы аэрозольной и молекулярной компонент и оптической толщи поглощения атмосферного озона, а индикатриса  $\chi(\gamma)$  рассеяния атмосферы состоят из взвешенной суммы аэрозольной и молекулярной составляющих [5,13].

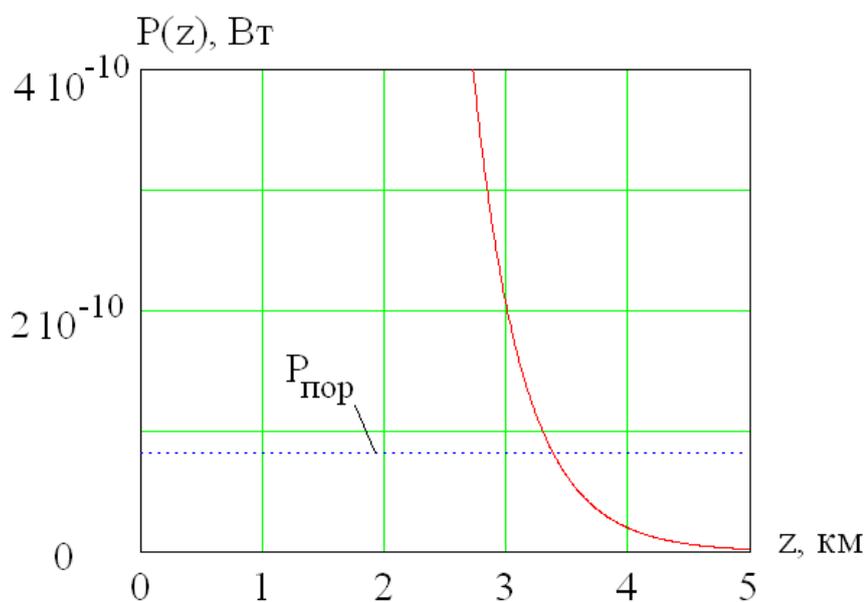
На рисунках 1 – 4 приведены полученные по формулам (1) - (4) зависимости мощности  $P(z)$  полезного сигнала и пороговой мощности  $P_{i\ddot{o}}$  от дальности зондирования  $z$  для лазерных длин волн 0,266; 0,308; 0,355 и 0,532 мкм.



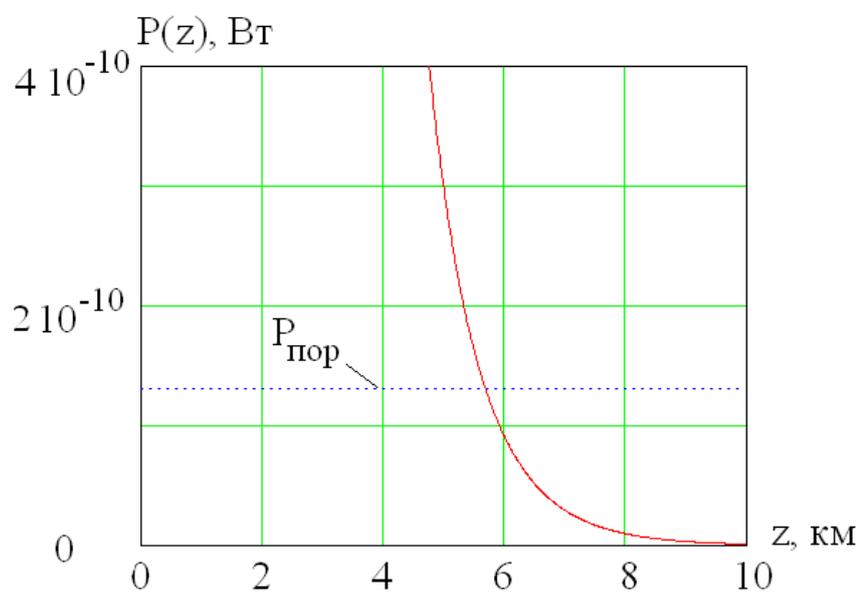
**Рис. 1** - Зависимость мощности полезного сигнала и пороговой мощности от дальности зондирования для длины волны 0,266 мкм



**Рис. 2** - Зависимость мощности полезного сигнала и пороговой мощности от дальности зондирования для длины волны 0,308 мкм



**Рис. 3** - Зависимость мощности полезного сигнала и пороговой мощности от дальности зондирования для длины волны 0,355 мкм



**Рис. 4** - Зависимость мощности полезного сигнала и пороговой мощности от дальности зондирования для длины волны 0,532 мкм

Предельные дальности зондирования оценивались из условия равенства мощности  $P(z)$  полезного сигнала и пороговой мощности приемника  $P_{\text{пд}}$ . Для длин волн 0,266; 0,355; 0,532 и 1,57 мкм предельные дальности зондирования приведены в таблице 6.

**Таблица 6** Предельные дальности зондирования

$\lambda$ , мкм	0,266	0,308	0,355	0,532
Предельная дальность зондирования, м	2510	3310	3380	5690

Из результатов, приведенных в таблице 6, видно, что для длин волн 0,266; 0,308 и 0,355 мкм (УФ диапазон) и 0,532 мкм (видимый диапазон) для горизонтальной трассы в земной атмосфере при выбранных значениях параметров предельная дальность локации лежит в диапазоне 2510 м – 5690 м.

Максимальная дальность локации соответствует видимому спектральному диапазону. При переходе в УФ диапазон дальность зондирования уменьшается. Это обусловлено тем, что при переходе в УФ диапазон возрастает ослабление атмосферы (в основном из-за поглощения озоном), причем этот эффект сглаживается уменьшением фонового излучения.

Наиболее приемлемой длиной волной локации в УФ диапазоне является 0,355 мкм. Для этой длины волны дальность локации уменьшается (по сравнению с видимым диапазоном 0,532 мкм) в примерно 1,5 раз, однако эта длина волны является гораздо более безопасной для глаз (чем 0,532 мкм).

Уменьшение дальности локации при переходе в ультрафиолетовый диапазон не особенно велико и может быть скомпенсировано изменением параметров передающего или приемного каналов лазерного локатора.

## Заключение

Максимальная дальность локации соответствует видимому спектральному диапазону. При переходе в УФ диапазон дальность локации уменьшается. Это обусловлено тем, что при переходе в УФ диапазон возрастает ослабление атмосферы (в основном из-за поглощения озоном), причем этот эффект сглаживается уменьшением фонового излучения. Наиболее приемлемой длиной волной локации в УФ диапазоне является 0,355 мкм. Для этой длины волны дальность локации уменьшается (по сравнению с видимым диапазоном 0,532 мкм) в примерно 1,5 раз, однако эта длина волны является гораздо более безопасной для глаз.

## Список литературы

1. Мусьяков М.П., Миценко И.Д., Ванеев Г.Г. Проблемы ближней лазерной локации. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 295 с.

2. Козинцев В.И., Орлов В.М., Белов М.Л., Городничев В.А., Стрелков Б.В. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 528 с.
3. Лабунец Л.В. Цифровые модели изображений целей и реализаций сигналов в оптических локационных системах. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 216 с.
4. Карасик В.Е., Орлов В.М. Лазерные системы видения. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 352 с.
5. Козинцев В.И., Белов М.Л., Орлов В.М., Городничев В.А., Стрелков Б.В. Основы импульсной лазерной локации. 2-е изд., доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 572 с.
6. В ультрафиолете камуфляж бесполезен // Война и Мир: сайт. Режим доступа: <http://www.warandpeace.ru/ru/news/view/52325> (дата обращения 20.04.2014).
7. Медведев Е.М., Данилин И.М., Мельников С.Р. Лазерная локация земли и леса. М.: Изд-во Геолидар, изд-во Геокосмос; Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2007. 229 с.
8. ГОСТ 31581-2012. Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий. М.: Стандартиформ, 2013. 19 с.
9. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
10. Миронов А.В. Разд. 4.4. Поглощение света атмосферным озоном // В кн.: Прецизионная фотометрия. Astronet: сайт. Режим доступа: <http://www.astronet.ru/db/msg/1169494/node29.html> (дата обращения 20.04.2014).
11. Ортенберг Ф. С., Трифонов Ю. М. Озон: взгляд из космоса. М.: Знание, 1990. 64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Космонавтика, астрономия»; № 9).
12. Electron tube detectors // Hamamatsu: website. Режим доступа: <http://www.hamamatsu.com/us/en/product/category/index.html> (дата обращения 29.10.2014).
13. Козинцев В.И., Белов М.Л., Городничев В.А., Стрелков Б.В. Расчет яркости фона и ослабления лазерного излучения в ультрафиолетовой области спектра. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 66 с.
14. Clark R.N., Swayze G.A., Wise R., Livo E., Hoefen T., Kokaly R., Sutley S.J. USGS digital spectral library splib06a: U.S. Geological Survey, Digital Data Series 231 // USGS: website, 2007. Режим доступа: <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06> (дата обращения 20.04.2014).

## Detection Range Estimation of UV Spectral Band Laser Radar

V.A. Gorodnichev<sup>1,\*</sup>, O.E. Pashenina<sup>1</sup>,  
M.L. Belov<sup>1</sup>, O.V. Gotalskaya<sup>1</sup>,  
A.V. Kuvshinov<sup>1</sup>

[\\*gorod@bmsu.ru](mailto:gorod@bmsu.ru)

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

---

**Keywords:** laser location, ultraviolet band, visible band, detection range

---

Recently, has come into existence an interest in the systems operating in the ultra-violet (UF) band of wavelengths, which use other spectral information (coefficients of reflection or radiation in UF range) about location objects, than laser systems in the visible, near or average infrared bands. Thus, a point is not only to receive additional (in another spectral range) information on location objects. Laser radiation in the UF spectral band of 0.315 – 0.4 microns is safer than laser radiation with the wavelengths of 0.38 – 1.4 microns.

The work presents a comparative estimation of the detection systems range of laser radars in the UV and visible spectral bands for the following wavelengths of radiation:

- UF band: 0.266 microns (the fourth harmonic of YAG-laser activated by neodymium ions), 0.308 microns (the XeCl-excimer laser), 0.355 microns (the third harmonic of YAG-laser activated by neodymium ions);
- visible band: 0.532 microns (the second harmonic of YAG-laser activated by neodymium ions).

Results of calculations show that for the horizontal pathway in the terrestrial atmosphere at the selected radiation wavelengths a detection range is in the range of 2510m – 5690 m.

The maximum range of detection corresponds to the visible spectral band. A sweep range decreases with transition to the UF band. This is caused by the fact that with transition to the UF band there is a rise of atmosphere attenuation (generally, because of absorption by ozone), this effect being smoothed by reducing background radiation.

In the UF band a wavelength of 0.355 microns is the most acceptable. For this wavelength a detection range is about 1,5 times less (in comparison with the visible band of 0.532 microns). However, this is the much more eye-safe wavelength. With transition to the UV band a detection range decreases not that much and can be compensated by changing parameters of transmitting or receiving channels of laser radar.

## References

1. Mus'iaikov M.P., Mitsenko I.D., Vaneev G.G. *Problemy blizhnei lazernoj lokatsii* [Problems of near-field laser location]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2000. 295 p. (in Russian).
2. Kozintsev V.I., Orlov V.M., Belov M.L., Gorodnichev V.A., Strelkov B.V. *Optiko-elektronnyye sistemy ekologicheskogo monitoringa prirodnoi sredy* [Optical-electronic systems of environmental monitoring of the natural environment]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2002. 528 p. (in Russian).
3. Labunets L.V. *Tsifrovye modeli izobrazhenii tselei i realizatsii signalov v opticheskikh lokatsionnykh sistemakh* [Digital image models of goals and implementations of signals in optical radar systems]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2007. 216 p. (in Russian).
4. Karasik V.E., Orlov V.M. *Lazernye sistemy videniia* [Laser vision systems]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2001. 352 p. (in Russian).
5. Kozintsev V.I., Belov M.L., Orlov V.M., Gorodnichev V.A., Strelkov B.V. *Osnovy impul'snoi lazernoj lokatsii* [The basics of pulsed laser location]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2010. 572 p. (in Russian).
6. V ul'trafiolete kamufliazh bespolezen [In the UV camouflage is useless]. *Voina i Mir* [War and Peace]: website. Available at: <http://www.warandpeace.ru/ru/news/view/52325>, accessed 20.04.2014. (in Russian).
7. Medvedev E.M., Danilin I.M., Mel'nikov S.R. *Lazernaia lokatsiia zemli i lesa* [Laser location of land and forest]. Moscow, Geolidar Publ., Geokosmos Publ.; Krasnoyarsk, Publ. of Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2007. 229 p. (in Russian).
8. GOST 31581-2012. *Lazernaia bezopasnost'. Obshchie trebovaniia bezopasnosti pri razrabotke i ekspluatatsii lazernykh izdelii* [State Standard 31581-2012. Laser safety. General safety requirements for development and operation of laser products.]. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 19 p. (in Russian).
9. Measures R.M. *Laser remote sensing. Fundamentals and applications*. J. Wiley and Sons, New York, 1984. 510 p. (Russ. ed.: Measures R.M. *Lazernoe distantsionnoe zondirovanie*. Moscow, Mir Publ., 1987. 550 p.).
10. Mironov A.V. Razd. 4.4. Pogloshchenie sveta atmosferynym ozonom [Sec. 4.4. Light absorption by atmospheric ozone]. In book: *Pretsizionnaia fotometriia* [Precision Photometry]. Astronet: website. Available at: <http://www.astronet.ru/db/msg/1169494/node29.html>, accessed 20.04.2014. (in Russian).

11. Ortenberg F. S., Trifonov Iu. M. *Ozon: vzgliad iz kosmosa* [Ozone: a view from space]. Moscow, Znanie Publ., 1990. 64 p. (*Novoe v zhizni, nauke, tekhnike. Ser. "Kosmonavtika, astronomiia"* [New in life, science, technology. Ser. "Cosmonautics, astronomy"]; no. 9). (in Russian).
12. Electron tube detectors. Hamamatsu: website. Available at: <http://www.hamamatsu.com/us/en/product/category/index.html> , accessed 20.04.2014.
13. Kozintsev V.I., Belov M.L., Gorodnichev V.A., Strelkov B.V. *Raschet iarkosti fona i oslableniia lazernogo izlucheniia v ul'trafioletovoi oblasti spectra* [Calculation of background luminance and laser attenuation in ltraviolet region of spectrum]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2011. 66 p. (in Russian).
14. Clark R.N., Swayze G.A., Wise R., Livo E., Hoefen T., Kokaly R., Sutley S.J. *USGS digital spectral library splib06a: U.S. Geological Survey, Digital Data Series 231*. USGS: website, 2007. Available at: <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06> , accessed 20.04.2014.