

ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 629.1.018.3

Дозиметрия лазерной визуальной системы посадки

Г.А. Калошин¹, С.А. Шишкин¹, В.И. Анисимов², В.В. Жуков^{2*}

¹ *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

² *Научно-исследовательский институт «Экран»
443022, г. Самара, пр. Кирова, 24*

Поступила в редакцию 30.11.2015 г.

Обсуждаются методические вопросы и теоретические результаты по определению границ лазерно-опасных зон (ЛОЗ) при воздействии на глаза прямого и рассеянного излучения, создаваемого лазерной системой посадки (ЛСП). Рассматриваются алгоритмы расчета ЛОЗ при наблюдении ЛСП в реальных условиях эксплуатации. Приведены результаты расчета ЛОЗ одиночного и группы лазерных источников для различных метеоусловий. Представлена компьютерная программа для проведения расчетов по дозиметрии лазерного излучения при работе системы посадки в реальных условиях применения.

Ключевые слова: лазерно-опасная зона, лазерная система посадки, аэрозольное ослабление, программный пакет; laser-dangerous zone, laser landing system, aerosol extinction, software package.

Введение

При разработке и эксплуатации лазерных систем посадки (ЛСП) важной является оценка безопасности лазерного излучения при визуальном наблюдении источников. Известно, что лазерный пучок обладает высокой плотностью излучения, которое в случае прямого воздействия при прохождении через зрачок глаза может фокусироваться на участок сетчатки размером несколько микрометров, увеличивая уровень облучения в сотни тысяч раз.

Проблеме дозиметрии лазерного излучения в отечественной литературе посвящено достаточно ограниченное количество работ [1]. При этом вопросам расчета и прогнозирования энергетической яркости при облучении органа зрения протяженными лазерными источниками и энергетической освещенности роговицы глаза точечными источниками в реальных условиях применения уделяется недостаточное внимание. Учитывая требования безопасности при производстве полетов, уровни лазерного излучения ЛСП должны не вызывать раздражения, яркого блеска и кратковременного ослепления [2] и в то же время быть достаточными для уверенного ориентирования.

Требования к методам и средствам дозиметрии определяются принятой системой нормирования. В нашей стране безопасные уровни излучения регламентируются СанПиН № 5804-91 [3]. За рубежом действуют стандарты ANSI Z136.1 [4] и IEC 60825-1 [5].

* Геннадий Александрович Калошин (gkaloshin@iao.ru); Сергей Александрович Шишкин (shishkin_s@mail.ru); Вячеслав Иванович Анисимов (mail@niekran.ru); Владимир Валентинович Жуков (mail@niekran.ru).

В статье приводятся результаты расчетов параметров лазерного излучения в части безопасной эксплуатации ЛСП, описание которой и схема размещения на взлетно-посадочной полосе (ВПП) изложены в [6]. При этом основной интерес представляет оценка границ лазерно-опасных зон (ЛОЗ) для летного экипажа и обслуживающего персонала при воздействии как прямого, так и рассеянного лазерного излучения ночью, в сумерках, днем при различных метеоусловиях.

1. Метод расчета границ лазерно-опасных зон

1.1. Исходные данные

Оценка границ ЛОЗ заключается в определении расстояния от источников ЛСП, на котором мощность или энергия излучения, прошедшая через зрачок глаза, может превышать значения предельно допустимого уровня (ПДУ) [3]. При проведении расчетов также был принят во внимание нормативный документ ИКАО [2]. В общем, для расчета ЛОЗ необходимо знать количество и угловые размеры источников, спектр излучения, условия и длительность воздействия лазерного излучения.

Параметры излучателей ЛСП и условия видимости, принятые для расчетов:

1) гауссов пучок с выходной мощностью $P_0 = 0,1-0,5$ Вт в непрерывном режиме; энергетическая расходимость излучения θ на уровне 0,5, равная не более 1 мрад; диапазон длин волн излучения $\lambda = 0,52-0,64$ мкм;

2) диапазоны изменения метеорологической дальности видимости $S_m = 0,8-1$ км (туман, дымка с моросью и радиационный туман), $S_m = 1-3$ км

(туманная дымка) и $S_m = 3-10$ км (континентальная и прибрежная дымка);

3) условия наблюдения: ночь, сумерки, день;

4) начало границ ЛОЗ для прямого излучения – место установки излучателя, для рассеянного излучения – порог ВПП при заходе на посадку и конец ВПП при пробеге самолета по ВПП. Диапазон изменения угла визирования между направлением на источник и осью пучка составляет 0,5–7 град.

Расчет ПДУ выполнен в соответствии с Сан-ПиН № 5804-91 [3]. Для расчета были приняты следующие условия воздействия излучения. При случайном попадании в прямое лазерное излучение за длительность воздействия взята величина $t = 0,25$ с, т.е. время, равное рефлекторной реакции глаза. Для летного экипажа дополнительно принято наиболее вероятное время нахождения в пучке $t = 2$ с. При проведении полетов среднее время наблюдения рассеянного лазерного излучения принято равным 60 с, время захода на посадку на заключительном этапе также составляет 60 с. Для технического персонала время воздействия определено равным $3 \cdot 10^4$ с [7].

В табл. 1 приведены расчетные значения ПДУ облучения $E_{\text{ПДУ}}$ для спектральных диапазонов $\Delta\lambda = 0,52-0,54$ мкм и $\Delta\lambda = 0,6-0,64$ мкм.

1.2. Уровень облучения, создаваемый прямым излучением ЛСП

При соосности оптических осей глаза и пучка уровень облучения, создаваемый гауссовым пучком, можно рассчитать согласно [1]:

$$E = \frac{2P_0}{\pi r^2} \exp(-\sigma(\lambda)l) \left(1 - \exp\left(\frac{-2r_{\text{зр}}^2}{r^2}\right) \right), \quad (1)$$

где l – расстояние от излучателя до зрачка глаза по оси пучка; $\sigma(\lambda)$ – спектральный коэффициент аэрозольного ослабления; $r = (d_0 + kl\theta_{0,5})/2$ – радиус сечения пучка в плоскости глаза при расходимости по уровню $1/e^2$, d_0 – начальный диаметр пучка, пучка, k – коэффициент, зависящий от уровня ограничения расходимости пучка (для уровня 0,5 значение $k = 1,698$ [1]); $r_{\text{зр}} = f(B_{\text{ф}})$ – радиус зрачка глаза, зависящий от яркости фона $B_{\text{ф}}$.

Непосредственный расчет границ ЛОЗ (параметры L, r) по формуле (1) проводится итерационным методом при выполнении условия $E = E_{\text{ПДУ}}$.

1.3. Уровень облучения, создаваемый рассеянным излучением ЛСП

При производстве полетов в поле зрения попадает рассеянное излучение от всех источников ЛСП. Уровень облучения, создаваемый рассеянным излучением от пучка, определяется геометрией схемы наблюдения и задается расстоянием от излучателя до точки визирования l_1 , расстоянием от наблюдателя до точки визирования l_2 и углом рассеяния φ (рис. 1).

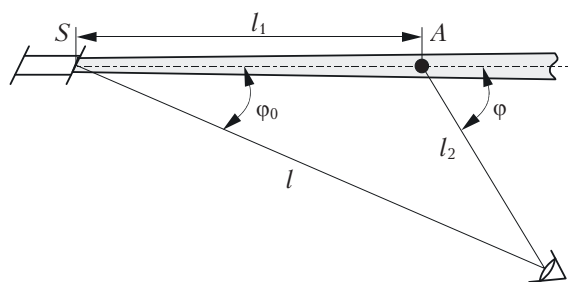


Рис. 1. Взаимное расположение лазерного пучка и наблюдателя

Расчет энергетической освещенности от одного лазерного пучка выполнен в приближении однократного рассеяния и был проведен по схеме, принятой в [6]. Тогда выражение для суммарной освещенности запишется в виде

$$E = \frac{P_0 \sigma(\lambda)}{4\pi l_2} \int_{\varphi_0}^{\pi/2} g(\varphi) \cos(\varphi) \exp(-\sigma(\lambda)(l_1 + l_2)) d\varphi, \quad (2)$$

где P_0 – мощность источника ЛСП; $\sigma(\lambda)$ – спектральный коэффициент аэрозольного ослабления; $g(\varphi)$ – коэффициент направленного светорассеяния.

1.4. Программа для расчета границ лазерно-опасных зон

Для оценки ЛОЗ при работе ЛСП использовалась программа CalcLOZ [7–9]. Интерфейс программы CalcLOZ приведен на рис. 2.

Таблица 1

Вид воздействия лазерного излучения	Предельно допустимые уровни облучения	
	$E_{\text{ПДУ}}, \text{Вт/м}^2$	
	$\Delta\lambda = 0,52-0,54$ мкм	$\Delta\lambda = 0,6-0,64$ мкм
Случайное попадание в прямое излучение (длительность $t = 0,25$ с)	2,43	4,95
Прямое излучение для летного экипажа (длительность $t = 2$ с)	1,22	2,47
Рассеянное излучение для летного экипажа (длительность $t = 60$ с)	1,61	3,26
Рассеянное излучение для технического персонала (длительность $t = 3 \cdot 10^4$ с)	0,049	0,1

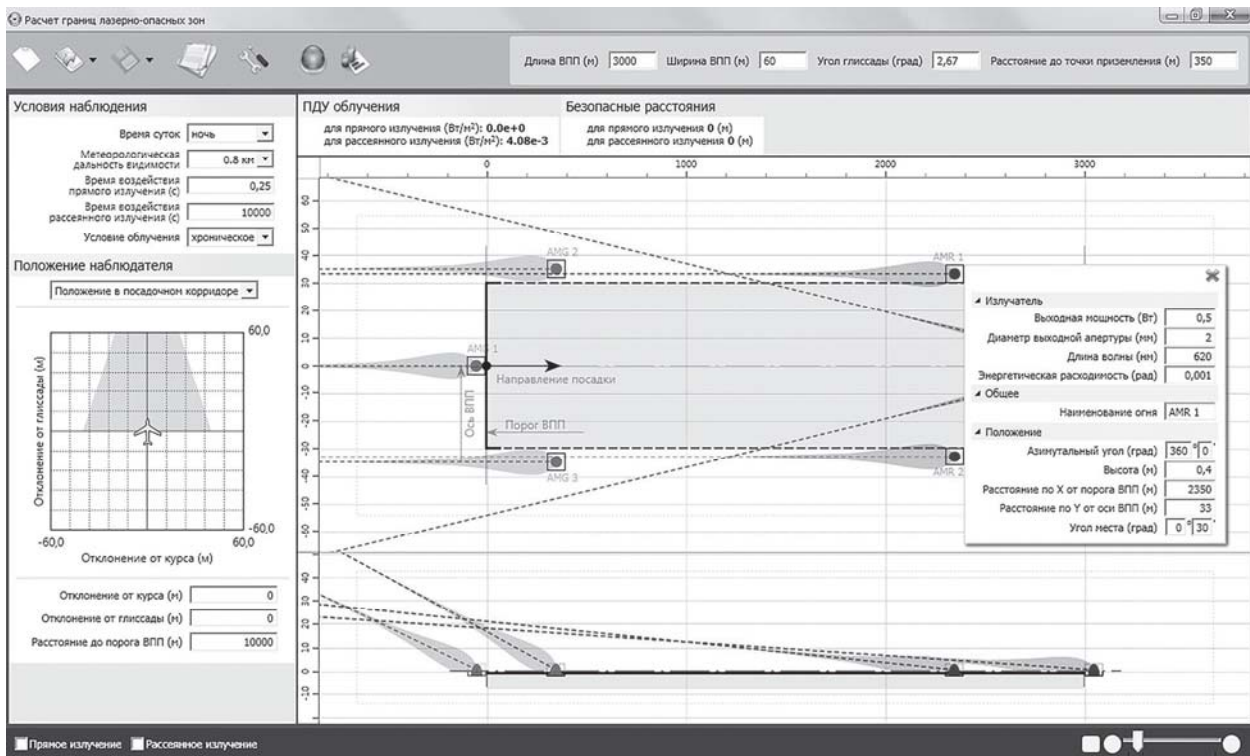


Рис. 2. Интерфейс программы CalcLOZ для оценки лазерно-опасных зон

Входными данными в программу являются геометрия наблюдения, количество излучателей, спектр излучения, условия и длительность воздействия лазерного излучения и потоки рассеянного излучения, рассчитываемые по программам [10, 11].

Программа CalcLOZ позволяет рассчитывать потоки излучения на приемник в приближении однократного рассеяния при заданных энергетических, пространственно-временных и спектральных характеристиках излучения, оптических параметрах среды, а также предельно допустимые уровни лазерного излучения для различных условий наблюдения в соответствии с отечественными и зарубежными нормами. Границы ЛОЗ можно видеть непосредственно на схеме размещения ЛСП. Алгоритм расчета представлен на рис. 3.

2. Результаты расчетов

2.1. Безопасные расстояния для летного экипажа

Параметры геометрии наблюдения задавались и рассчитывались по схеме, принятой в [6]. В табл. 2 приведены безопасные расстояния для летного экипажа при кратковременном входе в прямое лазерное излучение ЛСП (время воздействия не более 2 с).

Расчеты, представленные в табл. 2, показывают, что при производстве полетов допускается кратковременный вход при длительности воздействия не более 2 с в прямое лазерное излучение ЛСП на расстояниях от порога ВПП, не меньших, чем указано в табл. 2. Данные получены путем сравнения значений энергетической освещенности на зрачке глаза

наблюдателя с величиной ПДУ при наблюдении прямого лазерного излучения с мощностью от 0,1 до 0,5 Вт в зависимости от метеоусловий и спектрального диапазона. В этом случае расстояние, при котором уровень освещенности совпадает с ПДУ, и служит границей ЛОЗ. Кроме того, согласно американским и европейским нормам [4, 5] ПДУ мощности имеет одинаковое значение для спектрального интервала 0,38–1,4 мкм, но при этом в десять раз больше отечественных норм. Следовательно, безопасные расстояния будут еще больше, чем указанные в табл. 2.

На рис. 4 в качестве примера приведены результаты расчета безопасных расстояний при воздействии прямого лазерного излучения в ночных условиях при изменении метеорологической дальности видимости S_m и длительности воздействия t .

На рис. 5 показаны результаты расчета уровня облучения, создаваемого рассеянным излучением от ЛСП, для летного экипажа при заходе на посадку и при пробеге по ВПП. Видно, что расчетные уровни облучения ниже соответствующего ПДУ, равного согласно СанПиН № 5804-91 [3] 1,61 Вт/м². Следовательно, рассеянное лазерное излучение, создаваемое ЛСП, для летного экипажа является безопасным на любых удалениях от ЛСП независимо от метеоусловий.

2.2. Безопасные расстояния для обслуживающего персонала

В табл. 3 приведены безопасные расстояния для обслуживающего персонала при кратковременном входе в прямое лазерное излучение ЛСП (время воздействия не более 0,25 с).

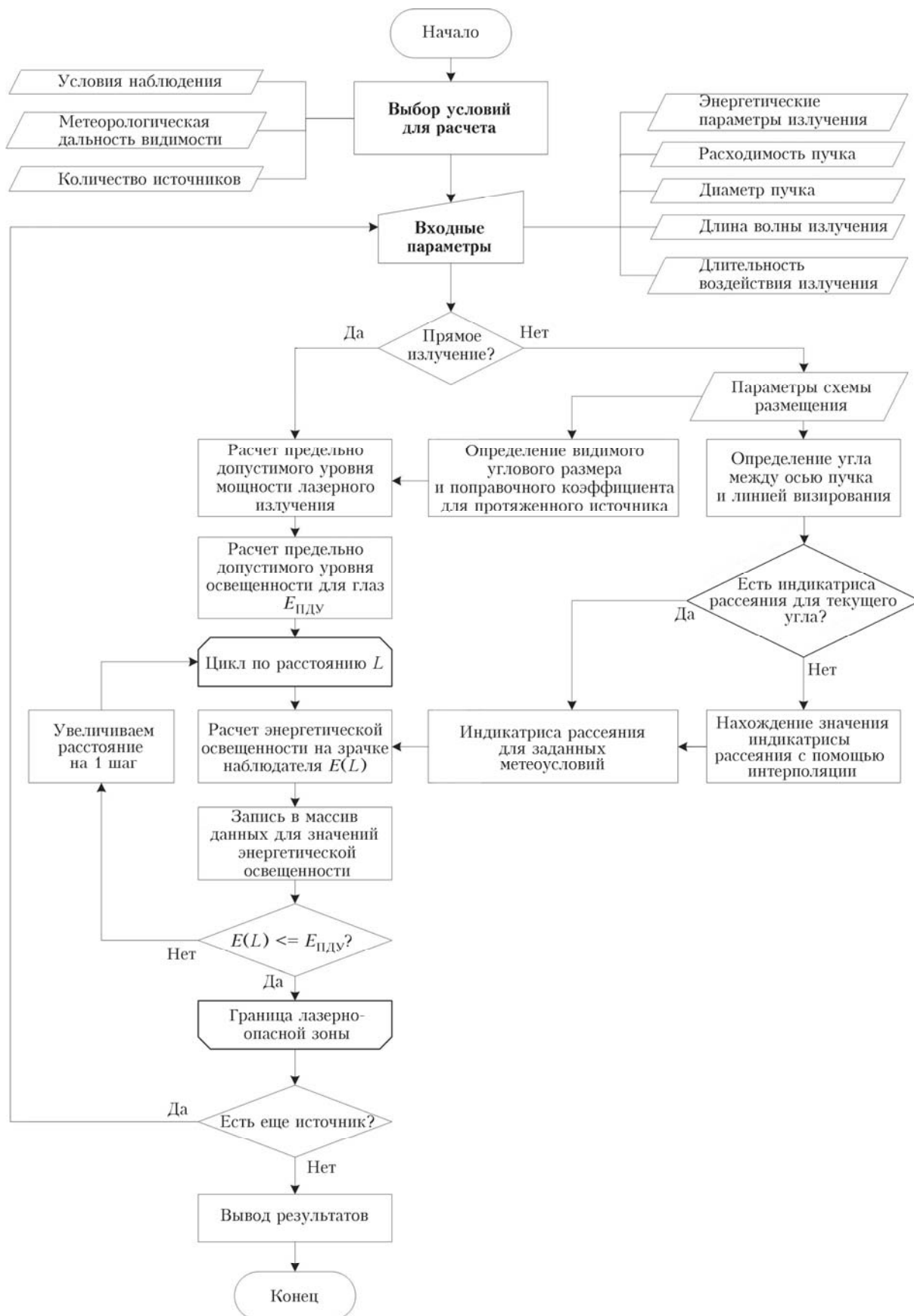


Рис. 3. Алгоритм расчета границ ЛОЗ

Наименьшие допустимые расстояния до порога ВПП для летного экипажа

S_m , км	Наименьшие допустимые расстояния до порога ВПП, м			
	$\Delta\lambda = 0,52-0,54$ мкм		$\Delta\lambda = 0,62-0,64$ мкм	
	Мощность не более 0,1 Вт; расходимость на уровне 0,5 не более 1 мрад	Мощность не более 0,5 Вт; расходимость на уровне 0,5 не более 1 мрад	Мощность не более 0,1 Вт; расходимость на уровне 0,5 не более 1 мрад	Мощность не более 0,5 Вт; расходимость на уровне 0,5 не более 1 мрад
0,8	180	300	140	200
1	190	330	150	260
5	250	500	180	370
10	260	550	190	400

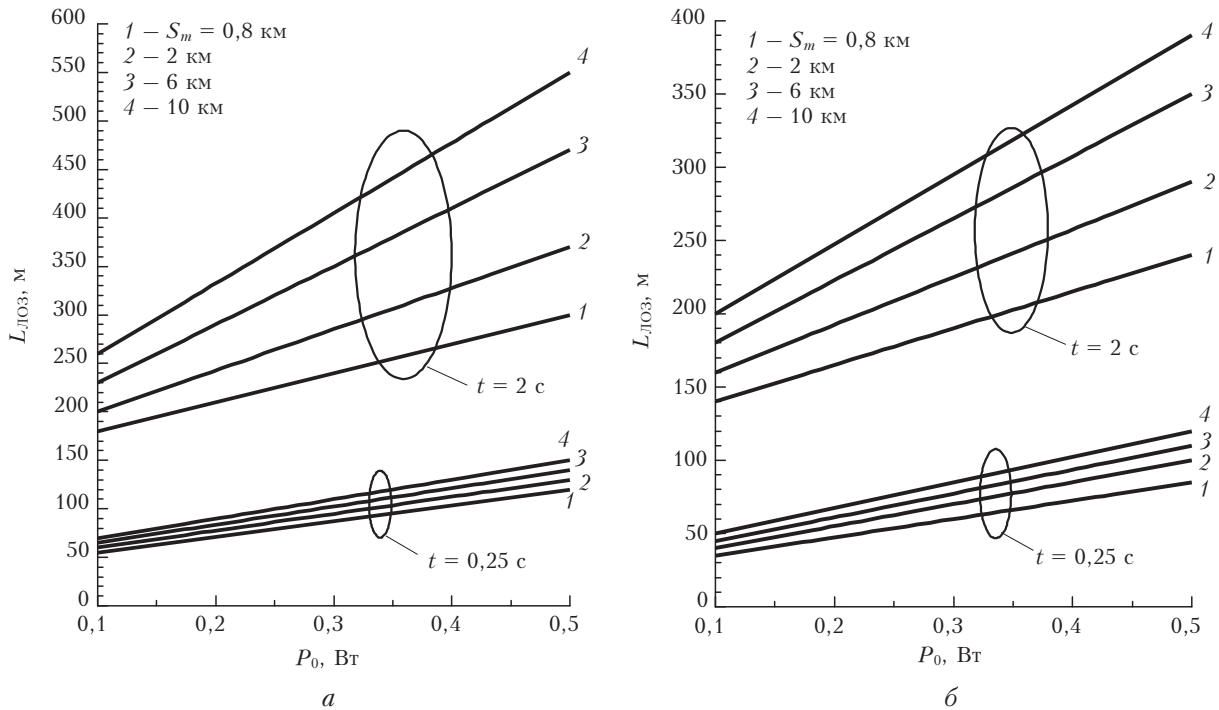


Рис. 4. Наименьшие безопасные расстояния $L_{ЛОЗ}$ для прямого излучения при пилотировании в зависимости от мощности излучения P_0 для спектральных диапазонов $\Delta\lambda = 0,52-0,54$ мкм (а) и $\Delta\lambda = 0,60-0,64$ мкм (б) при различных S_m

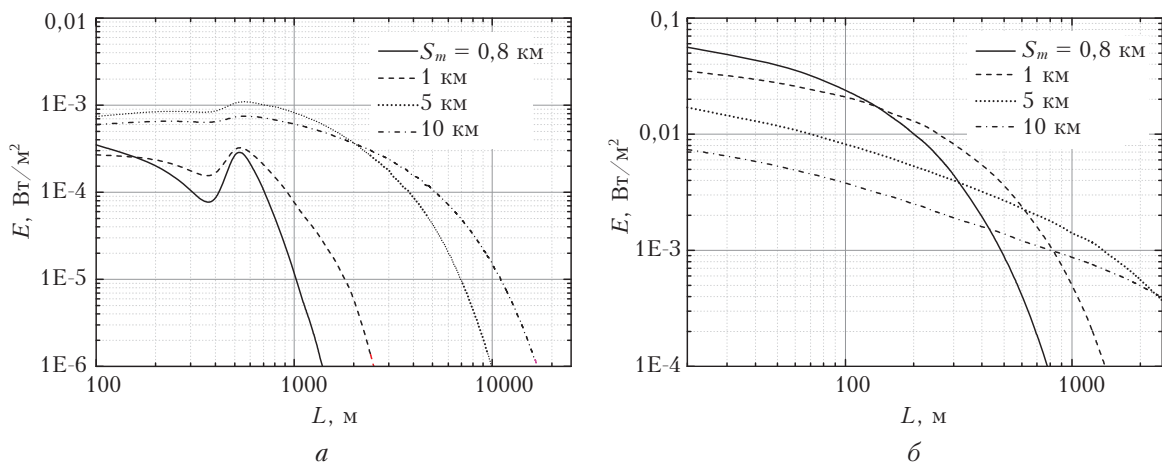


Рис. 5. Распределение уровня облучения E , создаваемого рассеянным излучением ЛСП с выходной мощностью 0,5 Вт, для различных метеоусловий в зависимости от расстояния L : а – при заходе на посадку; б – при пробеге по ВПП

Наименьшие допустимые расстояния до лазерных излучателей ЛСП для обслуживающего персонала

S_m , км	Наименьшее допустимое расстояние от источника, м			
	$\Delta\lambda = 0,52-0,54$ мкм		$\Delta\lambda = 0,62-0,64$ мкм	
	Мощность не более 0,1 Вт; расходимость на уровне 0,5 не более 1 мрад	Мощность не более 0,5 Вт; расходимость на уровне 0,5 не более 1 мрад	Мощность не более 0,1 Вт; расходимость на уровне 0,5 не более 1 мрад	Мощность не более 0,5 Вт; расходимость на уровне 0,5 не более 1 мрад
0,8	360	530	300	450
1	400	600	320	510
5	660	1200	500	930
10	740	1440	540	1090

Расчеты, представленные в табл. 3, показывают, что для обслуживающего персонала необходимо соблюдать меры безопасности на расстояниях, меньших, чем указано в табл. 3. Рассеянное излучение также представляет опасность на расстояниях меньше 5 м.

Заключение

Расчеты границ лазерно-опасных зон в ночных условиях дают основания для следующих выводов.

1. При пилотировании допускается кратковременный вход в прямое лазерное излучение любого из лазерных лучей ЛСП на расстояниях от порога ВПП, не меньших, чем указано на рис. 4.

2. Рассеянное излучение, создаваемое подсистемой, является безопасным для летного экипажа на любых удалениях от маяков, а также при пробеге самолета по ВПП.

3. В сумеречных и дневных условиях рассеянное излучение ЛСП является безопасным для летного экипажа на любых удалениях от ВПП.

4. Для обслуживающего персонала при эксплуатации ЛСП требуется соблюдение мер санитарной безопасности и использование средств индивидуальной защиты.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России – проект № 14.604.21.0042.

1. Кириллов А.И., Морсков В.Ф., Устинов Н.Д. Дозиметрия лазерного излучения // Под ред. Н.Д. Устинова. М.: Радио и связь, 1983. 192 с.
2. *Руководство* по лазерным излучателям в аспекте безопасности полетов. ICAO Doc 9815-AN/447. 2003. 87 с. URL: http://www.gsga.ru/favt_new/sites/default/files/ICAO_doc9815_0.pdf

3. *Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров* № 5804-91. М.: Инф.-изд. центр Госкомсанэпидемнадзора, 1993. 78 с.

4. *American National Standards Institute ANSI Z136.1: «American National Standard for Safe Use of Lasers»* / Laser Institute of America, 2007. 22 p. URL: https://www.lia.org/PDF/Z136_1_s.pdf

5. *International Electrotechnical Commission IEC 60825-1: «Safety of laser products, Part 1; Equipment Classification, Requirements, and User Guide»*. Geneva, Switzerland, 2009. 122 p. URL: http://www.ee.washington.edu/faculty/darling/ee436s15/IEC_60825_1.pdf

6. Калошин Г.А., Матвиенко Г.Г., Шишкин С.А., Анисимов В.И., Бутузов В.В., Жуков В.В., Столяров Г.В., Пасюк В.П. Потенциал лазерной системы посадки самолетов // *Оптика атмосф. и океана*. 2016. Т. 29, № 3. С. 232–242

7. Калошин Г.А., Шишкин С.А. Вопросы дозиметрии лазерного излучения при работе зрительных средств навигации // *Материалы XVIII Междунар. симп. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы»*. Томск, июль, 2012. Томск: Изд-во ИОА СО РАН. С. В183–В186.

8. *Программа* для оперативного расчета потоков рассеянного излучения для оценки санитарной безопасности лазерной системы посадки: Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2015611412 от 28.01.2015 г. / Калошин Г.А., Шишкин С.А., Жуков В.В.

9. *Программа* дозиметрического контроля лазерных систем посадки самолетов: Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2013619687 от 14.10.2013 г. / Калошин Г.А., Шишкин С.А., Анисимов В.И., Жуков В.В.

10. *Программа* по расчету характеристик прямого и рассеянного излучения лазерной системы посадки: Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2015611335 от 27.01.2015 г. / Калошин Г.А., Шишкин С.А., Жуков В.В.

11. *Методика* расчета контраста яркости лазерных систем посадки в сложных метеоусловиях: Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2013619682 от 14.10.2013 г. / Калошин Г.А., Шишкин С.А.

G.A. Kaloshin, S.A. Shishkin, V.I. Anisimov, V.V. Zhukov. **Dosimetry of visual laser landing systems.**

The methodological issues and theoretical results related to determination of the boundaries of laser-hazard distances (LHD) when eyes are exposed to direct and scattered radiation produced by a laser landing system (LLS) are discussed. LHD calculation algorithms during LLS operation in field conditions are considered. LHD have been calculated for a single and a group of laser sources for a variety of weather conditions. Computer software for laser radiation dosimetry calculation during LLS operation in field conditions is suggested.