НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ МГТУ ИМ. Н. Э. БАУМАНА НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ

Эл № ФС77 - 48211. Государственная регистрация №0421200025. ISSN 1994-0408

электронный научно-технический журнал

Сравнительный анализ мощности входных сигналов лазерных систем локации и видения ультрафиолетового диапазона # 08, август 2013 DOI: 10.7463/0813.0587120 Белов М. Л., Городничев В. А., Пашенина О. Е. УДК 621.375

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана <u>belov@bmstu.ru</u> <u>ekomonit@bmstu.ru</u> <u>gorod@bmstu.ru</u>

Введение

Лазерные системы локации и видения предназначены для решения широкого круга задач – для обнаружения и определения местоположения различных объектов, высокоточного измерения дальности или высоты над земной поверхностью, параметров движения объектов, дистанционного определения параметров атмосферы и гидросферы, дистанционного наблюдения объектов в условиях недостаточной естественной освещенности и т.п. В настоящее время лазерные системы локации и видения используются в геодезии и метеорологии, авиационной и космической технике, системах дистанционного зондирования, робототехнических системах и других областях науки и техники (см., например, [1-8]).

На сегодняшний день практически все существующие лазерные системы локации и видения (за редким исключением, связанный со спецификой конкретных задач) работают видимом, ближнем или среднем инфракрасных диапазонах длин волн (см., например, [1-8]).

В последнее время появился интерес к системам, работающим в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне длин волн (см., например, [9]). Однако, работ посвященных анализу возможностей лазерных систем, работающих в УФ диапазоне, на сегодняшний день нет.

Данная статья посвящена сравнительному анализу мощности входных сигналов лазерных систем локации и видения, работающих в ультрафиолетовом диапазоне длин волн.

1. Постановка задачи

Ультрафиолетовое излучение – это невидимое глазом электромагнитное излучение, занимающее спектральную область между видимым и рентгеновским излучениями в пределах длин волн 0,01—0,4 мкм. Вся ультрафиолетовая область спектра условно делится на ближнюю (0,2—0,4 мкм) и далёкую, или вакуумную (0,01—0,2 мкм). Последнее название обусловлено тем, что ультрафиолетовое излучение этого участка сильно поглощается воздухом. При этом излучение с длиной волны $\lambda < 0,3$ мкм в естественных условиях земной атмосферы вообще отсутствует.

Практический интерес для лазерных систем локации и видения имеет ближняя УФ область 0,2 – 0,4 мкм. Этот интерес к ультрафиолетовой области спектра вызван резким уменьшением в УФ диапазоне фонового излучения (см. рисунок 1 [10]).



Рисунок 1 - Спектральная зависимость яркости безоблачного неба

На рисунке 1 показана спектральная зависимость фоновой яркости безоблачного неба (создаваемая рассеянной в атмосфере солнечной радиацией) на уровне моря для зенитного

угла Солнца 45[°] при большой метеорологической дальности видимости. Из рисунка видно, что в ультрафиолетовом диапазоне (на длинах волн близких к длине волны 0,3 мкм) яркость фонового излучения резко падает. Причиной этого является поглощение ультрафиолетового излучения озонным слоем Земли (см., например, [11-14]).

Спектральная зависимость суммарной оптической толщи τ_Σ(λ) всей земной атмосферы (в вертикальном направлении) в спектральном диапазоне 0,3 – 0,5 мкм приведена в Таблице 1 [15].

Таблица 1

Спектральная зависимость суммарной оптической толщи $\tau_{\Sigma}(\lambda)$ всей земной атмосферы (в

Длина волны, мкм	$ au_{\Sigma}(\lambda)$	
0,30	4,968	
0,32	1,551	
0,34	1,046	
0,36	0,872	
0,38	0,744	
0,40	0,619	
0,45	0,455	
0,5	0,370	

вертикальном направлении).

Таблица 1 [12] показывает, что суммарная оптическая толща земной атмосферы увеличивается более чем в 10 раз при изменении длины волны от 0,5 мкм (видимый диапазон) до 0,3 мкм (УФ диапазон).

Однако, 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 (см. рисунок 2 [16]).



Рисунок 2 – Высотное распределение атмосферного озона

На рисунке 2 показано распределение количества атмосферного озона с высотой над уровнем моря. Как видно из рисунка в тропосфере до высот ~ 10 км концентрация озона мала. В стратосфере же содержание его резко увеличивается, достигая пикового значения, а затем быстро уменьшается. Когда говорят об озонном слое, то обычно понимают область его максимальной концентрации (находящуюся в стратосфере). В тропосфере (где работает большинство лазерных систем локации и видения) фоновое содержание озона невелико – 30...65 мкг/м³ и здесь (до высот порядка 16 км) находится всего около 8% общего содержания озона в атмосфере [17, 18].

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

Отметим, что в ближнюю ультрафиолетовую область спектра (0,2 – 0,4 мкм) попадает излучение следующих лазеров: четвертая (0,266 мкм) и третья (0,355 мкм) гармоники лазера на стекле с неодимом и на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом; азотного лазера (0,337 мкм); гелий-кадмиевый лазера (0,325 мкм); вторая гармоника лазера на рубине (0,347 мкм); лазеров на криптоне (0,35 и 0,356 мкм) и аргоне (0,333; 0,351 и 0,363 мкм); вторая гармоника лазера на сапфире с титаном (0,35 – 0,4 мкм); эксимерных лазеров на галогенидах инертных газов, например, KrF (0,248 мкм), XeCl (0,308 мкм), XeF (0,351 мкм) и других.

Таким образом, в УФ области существуют достаточно мощные лазерные источники излучения.

Однако, вопрос о выборе наилучшего варианта лазерной системы локации и видения УФ диапазона и его преимущества по сравнения с системами в видимом диапазоне не ясен, так как атмосферные характеристики (молекулярное и аэрозольное рассеяние, поглощение атмосферными газами) и коэффициенты отражения земных поверхностей сильно зависят от длины волны.

Для прозрачной земной атмосферы аналитическая формула для мощности P(t) лазерного сигнала при локации земной поверхности (земную поверхность считаем ламбертовской) имеет вид (при моностатической локации вертикально вниз и узком лазерном пучке) [5]:

$$P(t) \cong \frac{AP_o T_{\dot{e}} T_{i} T_a^2 r_i^2}{L^2 (1 + \frac{\alpha_{\dot{e}}^2}{\alpha_i^2})} f(t')$$
(1)

где:

 T_a - пропускание земной атмосферы на трассе «лазерный локатор - поверхность»;

L - расстояние от лазерного локатора до поверхности;

f(t') - форма импульса лазерного источника; $t' = t - \frac{2L}{c}$;

А - альбедо (энергетический коэффициент отражения) земной поверхности;

Ро - мощность, излучаемая лазерным источником;

 T_n, T_u - коэффициенты пропускания приемной и передающей оптики лазерного локатора;

 $\alpha_{u,n}$ - угол расходимости излучения источника и угол поля зрения приемной системы;

*г*_{*n*} - эффективный радиус приемного объектива.

2. Анализ спектральной зависимости атмосферного ослабления в ультрафиолетовой области спектра

Одним из основных факторов, существенно влияющих на величину принимаемой мощности P(t) лазерного локационного сигнала, является пропускание T_a земной атмосферы.

Ослабление лазерного излучения в земной атмосфере в УФ спектральном диапазоне

происходит за счет селективного поглощения газовыми компонентами, молекулярного (релеевского) рассеяния и аэрозольного рассеяния.

Основной вклад в молекулярное поглощение в УФ диапазоне вносят озон и кислород – см. рисунок 3 [19], на котором приведен спектр поглощения земной атмосферы.

На рисунке 3 схематически изображено поглощение атмосферы на уровне земной поверхности с указанием основных поглощающих газов. Верхняя кривая характеризует спектр поглощения солнечного излучения, достигающего поверхности земли. Нижняя получена при тех же условиях, но запись проводилась на высоте 11 км.



Рисунок 3 - Спектр поглощения земной атмосферы

Кислород имеет интенсивные полосы поглощения в УФ областях 0,17 – 0,19 мкм и 0,24 - 0,26 мкм, причем последняя область переходит в континуум, простирающийся в сторону коротких волн до 0,2 мкм. Озон сильно поглощает в УФ диапазоне излучение с длиной волны короче 0,32 мкм.

На рисунке 4 [12] приведены (в логарифмическом масштабе) спектры кислорода и озона в спектральном диапазоне 0,15 – 0,35 мкм (*k* - десятичный объемный коэффициент поглощения). Здесь кривая 1 – спектральная зависимость коэффициента поглощения озоном, кривая 2 – спектральная зависимость коэффициента поглощения кислородом.

Из рисунка 4 видно, что суммарное поглощение озоном и кислородом заметно возрастает с уменьшением длины волны в УФ области 0,15 – 0,35 мкм.



Рисунок 4 - Спектры кислорода и озона в спектральном диапазоне 0,15 - 0,35 мкм

Показатели молекулярного рассеяния $\sigma_R(\lambda)$ (в приземном слое атмосферы для стандартных условий) для диапазона 0,2 – 0,55 мкм приведены в Таблице 2 [20-22].

Таблица 2

λ, мкм	$\sigma_R(\lambda)$, км $^{-1}$	λ, мкм	$\sigma_R(\lambda)$, км $^{-1}$
0,20	9,202.10 ⁻¹	0,34	$8,494 \cdot 10^{-2}$
0,22	5,781.10 ⁻¹	0,36	6,68·10 ⁻²
0,24	3,859.10 ⁻¹	0,38	$5,327 \cdot 10^{-2}$
0,26	2,690.10 ⁻¹	0,40	$4,303 \cdot 10^{-2}$
0,28	1,940.10 ⁻¹	0,45	$2,644 \cdot 10^{-2}$
0,30	1,437.10 ⁻¹	0,50	1,716.10 ⁻²
0,32	1,098.10 ⁻¹	0,55	$1,162 \cdot 10^{-2}$

Значения показателя молекулярного рассеяния для спектрального диапазона 0,2 – 0,55 мкм.

На рисунке 5 [22] показана спектральная зависимость суммарного показателя ослабления излучения α (вследствие как молекулярного рассеяния, так и молекулярного поглощения) в приземной чистой атмосфере при метеорологической дальности видимости

100 км (совершенно чистый воздух по Международной шкале видимости – т.е. в отсутствие аэрозольного рассеяния) в диапазоне 0,2 – 0,55 мкм.



Рисунок 5 - Зависимость показателя ослабления излучения вследствие молекулярного рассеяния и поглощения

Из таблицы 2 и рисунка 5 видно, что показатель молекулярного рассеяния и суммарный показатель ослабления (вследствие как молекулярного рассеяния, так и молекулярного поглощения) сильно возрастает в УФ диапазоне с уменьшением длины волны излучения.

Влияние аэрозольного рассеяния на распространение излучения в УФ диапазоне иллюстрирует рисунок 6. Здесь показаны результаты расчетов спектральной зависимости пропускания T_a аэрозольной атмосферы [21]. Белые кружки – континентальная дымка, черно-белые кружки – морская дымка.



Рисунок 6 – Пропускание аэрозольной атмосферы

Из рисунка 6 видно, что пропускание аэрозольной атмосферы при уменьшении длины волны излучения существенно уменьшается (т.е. показатель аэрозольного ослабления существенно увеличивается) для континентальной дыми во всем УФ диапазоне, а для морской дымки – начиная с длины волны ~ 0,35 мкм.

3. Анализ спектральной зависимости коэффициентов отражения земной поверхности в ультрафиолетовой области спектра

Еще одним фактором, существенно влияющих на величину принимаемой мощности лазерного локационного сигнала, является коэффициент отражения (альбедо) *А* земной поверхности.

В настоящее время существуют несколько спектральных библиотек с данными о коэффициентах отражения в ультрафиолетовой, видимой, ближней и средней инфракрасной областях. Спектральные библиотеки представляют собой наборы графиков-кривых спектральной отражательной способности объектов, полученные многоканальными спектрометрами в полевых или лабораторных условиях. В статье были использованы данные спектральной библиотеки USGS Digital Spectral Library (версия splib06а - сентябрь, 2007). Библиотека USGS Spectroscopy Lab's содержит данные о спектральной отражательной способности минералов, горных пород, грунтов, жидкостей, растительности, искусственных материалов в диапазоне от 0,2 до 150 микрометров. Всего в библиотеке более 1300 спектральных кривых.

На рисунке 7 приведены коэффициенты отражения некоторых минералов, горных пород, грунтов, жидкостей, растительности, металлов для разных длин волн [23, 24].



Рисунок 7 – Коэффициенты отражения для разных длин волн

На рисунке 7 ряд 1 соответствует длине волны 0,266 мкм (четвертая гармоника лазера на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом), ряд 2 – 0,308 мкм (эксимерный XeCl лазер), ряд 3 – 0,337 мкм (азотный лазер), ряд 4 – 0,355 мкм (третья гармоника лазера на иттрийалюминиевом гранате с неодимом), ряд 5 – 0,532 мкм (вторая гармоника лазера на иттрийалюминиевом гранате с неодимом). По оси абсцисс отложены номера і объектов, а по оси ординат – соответствующие им коэффициенты отражения. Нумерация объектов отражения: 1 - железный гранат; 2 - квасцовый камень; 3 - безводный гипс; 4 - известковый шпат; 5 красный железняк; 6 – нефрит; 7 - железный колчедан; 8 – кварц; 9 – тальк; 10 – кальцит + доломит; 11 – красный железняк + кварц; 12 - карбонат магния; 13 - красная железная руда, тонкая плёнка; 14 – морская вода, прибрежная зона; 15 – морская вода, открытый океан; 16 – зеленая сухая трава; 17 – зеленые листья орехового дерева; 18 – газонная трава; 19 – алюминий; 20 – хром; 21 – никель.

Из рисунка 7 хорошо видно, что наибольшие значения коэффициентов отражения реализуются в видимом диапазоне на длине волны 0,532 мкм, а в ультрафиолетовом диапазоне (для используемых лазерных длинах волн) - на длине волны 0,355 мкм. На этих же длинах волн реализуются, как правило, и наибольшие контрасты коэффициента отражения между объектами отражения. Исключение (для длины волны 0,532 мкм) составляют, например, металлы. Поэтому вопрос о контрастах коэффициента отражения (при разных длинах волн) для искусственных объектов требует дополнительного экспериментального исследования.

Заключение

Проведенный анализ показывает, что для обеспечения максимальной мощности входных сигналов лазерных систем в УФ области спектра представляется перспективным использовать диапазон 0,3-0,4 мкм. Причем, с одной стороны, чем ближе длина волны к 0,4 мкм, тем больше коэффициенты отражения и меньше поглощение и рассеяние в земной атмосфере. С другой стороны, чем ближе длина волны к 0,3 мкм, тем меньше фоновое излучение. Какая длина волны (в пределах диапазона 0,3-0,4 мкм) наиболее перспективная будет определяться потенциально достижимыми в диапазоне 0,3-0,4 мкм техническими характеристиками лазерных систем (энергией в импульсе лазеров, чувствительностью приемников и т.п.).

Список литературы

1. Матвеев И.Н., Протопопов В.В., Троицкий Н.Д., Устинов Н.Д. Лазерная локация. М.: Машиностроение, 1984. 271 с.

Орлов В.М., Самохвалов И.В., Креков Г.М. и др. Сигналы и помехи в лазерной локации.
 М.: Радио и связь, 1985. 264 с.

3. Протопопов В.В., Устинов Н.Д. Инфракрасные лазерные локационные системы. М.: Военное изд-во, 1987. 175 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., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 572 с.

6. Kozintsev V.I., Belov M.L., Gorodnichev V.A., Smirnova O.A., Fedotov Yu.V., Khroustaleva A.M. Lidar method of oil pollution detection on rough sea surface // Proc. SPIE, 2005. Vol. 5829
[13th International Workshop on Lidar Multiple Scattering Experiments (March 25, 2005)]. P. 255-264. <u>http://dx.doi.org/10.1117/12.617521</u>.

7. Козинцев В.И., Белов М.Л., Городничев В.А., Смирнова О.А., Федотов Ю.В., Хрусталева А.М. Двухугловой лазерный метод обнаружения нефтяных загрязнений на неровной морской поверхности // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2005. № 1. С. 19-29.

8. Козинцев В.И., Белов М.Л., Городничев В.А., Федотов Ю.В. Лазерный метод измерения толщины пленок нефти на взволнованной морской поверхности, основанный на определении коэффициента пропускания пленки // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20, № 4. С. 338-340.

9. В ультрафиолете камуфляж бесполезен. Режим доступа:

http://www.warandpeace.ru/ru/news/view/52325 (дата обращения 20.04.2013).

10. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.

11. Valley S.B., ed. Handbook of Geophysics and space environment. AFCRL (Air Force Cambridge Research Labs), US Air Force. 1965.

12. Химия озонового слоя. Часть 2. Поглощение УФ озоном. Режим доступа: <u>http://redandr.blogspot.ru/2007/12/2.html</u> (дата обращения 20.04.2013).

13. Мосин О.В. Поглощение солнечного излучения атмосферой и гидросферой Земли и происхождение жизни. Режим доступа: http://www.zhurnal.lib.ru (дата обращения 20.04.2013).

14. Berkner L.V., Marshall L.C. On the origin and rise of oxygen concentration in the earth's atmosphere // J. Atmospheric Sci. 1965. Vol. 22. P. 225-261.

15. Лившиц Г.Ш. Рассеянный свет дневного неба. Алма-Ата: Наука, 1973. 147 с.

16. Миронов А.В. Поглощение света атмосферным озоном // Прецизионная фотометрия. Гл.
4.4. Режим доступа: <u>http://www.astronet.ru/db/msg/1169494/node29.html</u> (дата обращения 20.04.2013).

17. Хргиан А.Х. Физика атмосферы. М.: Изд-во МГУ, 1986. 326 с.

 Ортенберг Ф.С., Трифонов Ю.М. Озон: взгляд из космоса (Космический мониторинг атмосферного озона). М.: Знание, 1990. 64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Космонавтика, астрономия»; № 9).

19. Коллис Р.Т.Х., Хинкли Э.Д., Инаба Х. и др. Лазерный контроль атмосферы : пер. с англ. / под ред. Э.Д. Хинкли. М.: Мир, 1979. 416 с.

20. Bucholtz A. Rayleigh-scattering calculations for the terrestrial atmosphere // Applied Optics. 1995. Vol. 34, no. 15. P. 2765-2773.

21. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере. М.: Советское радио, 1977. 368 с.

22. Андреев Г.А., Бисярин В.П., Соколов А.В, Стрелков Г.М. Распространение лазерного излучения в атмосфере Земли // Итоги науки и техники. Сер. Радиотехника. Т. 2. М.: ВИНИТИ, 1977. С. 1-148.

23. USGS Digital Spectral Library 06. Режим доступа: <u>http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06</u> (дата обращения 20.04.2013).

24. Прядко А. Светотехнические материалы // Журнал «625». 2005. № 1. Режим доступа: <u>http://rus.625-net.ru/625/2005/01/prjadko.htm</u> (дата обращения 20.04.2013).

SCIENTIFIC PERIODICAL OF THE BAUMAN MSTU SCIENCE and EDUCATION

EL Nº FS77 - 48211. Nº0421200025. ISSN 1994-0408

electronic scientific and technical journal

Comparative analysis of input signal power of laser systems for target location and ultraviolet vision

08, August 2013 DOI: 10.7463/0813.0587120 Belov M.L., Gorodnichev V.A., Pashenina O.E.

> Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation <u>belov@bmstu.ru</u> <u>ekomonit@bmstu.ru</u> <u>gorod@bmstu.ru</u>

This paper presents results of a comparative analysis of input signal power of laser systems for target location and ultraviolet vision. It was shown that the spectral band of 300-400 nm is promising for laser systems of the ultraviolet range operating in the earth atmosphere. Within the spectral band of 300-400 nm coefficients of ground reflection have greater values, and coefficients of atmospheric attenuation have smaller values then they do within the spectral band of 200-300 nm. The closer the wavelength gets to the value of 300 nm, the less background sun noise becomes.

Publications with keywords: <u>laser system</u>, <u>ultraviolet range</u>, <u>atmospheric attenuation</u>, <u>ground</u> reflection coefficient</u> Publications with words: <u>laser system</u>, <u>ultraviolet range</u>, <u>atmospheric attenuation</u>, <u>ground</u> reflection coefficient

References

1. Matveev I.N., Protopopov V.V., Troitskiy N.D., Ustinov N.D. *Lazernaya lokatsiya* [Laser ranging]. Moscow, Mashinostroenie, 1984. 271 p.

2. Orlov V.M., Samokhvalov I.V., Krekov G.M., et al. *Signaly i pomekhi v lazernoy lokatsii* [Signals and noise in laser ranging]. Moscow, Radio i svyaz', 1985. 264 p.

3. Protopopov V.V., Ustinov N.D. *Infrakrasnye lazernye lokatsionnye sistemy* [Infrared laser positioning system]. Moscow, Voennoe izdatel'stvo, 1987. 175 p.

4. Karasik V.E., Orlov V.M. *Lazernye sistemy videniya* [Laser vision systems]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2001. 352 p.

5. Kozintsev V.I., Belov M.L., Orlov V.M., Gorodnichev V.A., Strelkov B.V. *Osnovy impul'snoi lazernoi lokatsii* [The basics of pulsed laser ranging]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2010. 572 p.

6. Kozintsev V.I., Belov M.L., Gorodnichev V.A., Smirnova O.A., Fedotov Yu.V., Khroustaleva A.M. Lidar method of oil pollution detection on rough sea surface. *Proc. SPIE*, 2005, vol. 5829, 13th International Workshop on Lidar Multiple Scattering Experiments, March 25, 2005, pp. 255-264. <u>http://dx.doi.org/10.1117/12.617521</u>

7. Kozintsev V.I., Belov M.L., Gorodnichev V.A., Smirnova O.A., Fedotov Yu.V., Khroustaleva A.M. Dvukhuglovoy lazernyy metod obnaruzheniya neftyanykh zagryazneniy na nerovnoy morskoy poverkhnosti [Bi-angular laser method to detect oil spots on uneven sea surface]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie* [Herald of the Bauman MSTU. Ser. Instrument Engineering], 2005, no. 1, pp. 19-29.

8. Kozintsev V.I., Belov M.L., Gorodnichev V.A., Fedotov Yu.V. Lazernyy metod izmereniya tolshchiny plenok nefti na vzvolnovannoy morskoy poverkhnosti, osnovannyy na opredelenii koeffitsienta propuskaniya plenki [Laser method for remote control for oil film thickness on rough sea surface based on transmissivity determination]. *Optika atmosfery i okeana*, 2007, vol. 20, no. 4, pp. 338-340. (English translation: Kozintsev V.I., Belov M.L., Gorodnichev V.A., Fedotov Yu.V. The paper discusses the results of complex studies, dealing with use of the phenomenon of laser-induced fluorescence (LIF) for remote monitoring of the state of vegetation cover. We outline the specific features of functional scheme of new-generation. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2007, vol. 20, no. 4, pp. 303-305.).

9. *V ul'trafiolete kamuflyazh bespolezen* [In the ultraviolet camouflage is useless]. Available at: <u>http://www.warandpeace.ru/ru/news/view/52325</u>, accessed 20.04.2013.

10. Measures R.M. *Laser remote sensing*. *Fundamentals and applications*. J. Wiley & Sons, New York, 1984. 510 p. (Russ. ed.: Mezheris R. *Lazernoe distantsionnoe zondirovanie*. Moscow, Mir, 1987. 550 p.).

11. Valley S.B., ed. *Handbook of Geophysics and space environment*. AFCRL (Air Force Cambridge Research Labs), US Air Force, 1965.

12. *Khimiya ozonovogo sloya. Chast' 2. Pogloshchenie UF ozonom* [Chemistry of the ozone layer. Part 2. Absorption of UV by ozone]. Available at: <u>http://redandr.blogspot.ru/2007/12/2.html</u>, accessed 20.04.2013.

13. Mosin O.V. *Pogloshchenie solnechnogo izlucheniya atmosferoy i gidrosferoy Zemli i proiskhozhdenie zhizni* [Absorption of solar radiation by the atmosphere and hydrosphere of the Earth and the origin of life]. Available at: <u>http://www.zhurnal.lib.ru</u>, accessed 20.04.2013.

14. Berkner L.V., Marshall L.C. On the origin and rise of oxygen concentration in the earth's atmosphere. *J. Atmospheric Sci.*, 1965, vol. 22, pp. 225-261.

15. Livshits G.Sh. *Rasseyannyy svet dnevnogo neba* [Diffused light of the daytime sky]. Alma-Ata, Nauka, 1973. 147 p.

16. Mironov A.V. Pogloshchenie sveta atmosfernym ozonom [Light absorption by atmospheric ozone]. In: *Pretsizionnaya fotometriya* [Precision photometry]. Ch. 4.4. Available at: <u>http://www.astronet.ru/db/msg/1169494/node29.html</u>, accessed 20.04.2013.

17. Khrgian A.Kh. Fizika atmosfery [Atmospheric physics]. Moscow, MSU Publ., 1986. 326 p.

18. Ortenberg F.S., Trifonov Yu.M. Ozon: vzglyad iz kosmosa (Kosmicheskiy monitoring atmosfernogo ozona) [Ozone: a view from space (Space monitoring of atmospheric ozone)].
Moscow, Znanie, 1990. 64 p. (Novoe v zhizni, nauke, tekhnike. Ser. "Kosmonavtika, astronomiya" [New in life, science, technology. Ser. "Astronautics, astronomy"]; no. 9).

19. Hinckley E.D., ed. *Laser Monitoring of the Atmosphere*. Springer-Verlag, Berlin, 1976. DOI: 10.1007/3-540-07743-X (Russ. ed.: Kollis R.T.Kh., Khinkli E.D., Inaba Kh., et al., Khinkli E.D., ed. *Lazernyy kontrol' atmosfery*. Moscow, Mir, 1979. 416 p.).

20. Bucholtz A. Rayleigh-scattering calculations for the terrestrial atmosphere. *Applied Optics*. 1995, vol. 34, no. 15, pp. 2765-2773.

21. Zuev V.E., Kabanov M.V. *Perenos opticheskikh signalov v zemnoy atmosphere* [Transfer of optical signals in the earth's atmosphere]. Moscow, Sovetskoe radio, 1977. 368 p.

22. Andreev G.A., Bisyarin V.P., Sokolov A.V, Strelkov G.M. Rasprostranenie lazernogo izlucheniya v atmosfere Zemli [Propagation of laser radiation in the Earth's atmosphere]. *Itogi nauki i tekhniki. Ser. Radiotekhnika.* Vol. 2. Moscow, VINITI, 1977, pp. 1-148.

23. USGS Digital Spectral Library 06. Rezhim dostupa: <u>http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06</u>, accessed 20.04.2013.

24. Pryadko A. Svetotekhnicheskie materialy [Lighting technical materials]. *Journal "625"*, 2005, no. 1. Available at: <u>http://rus.625-net.ru/625/2005/01/prjadko.htm</u>, accessed 20.04.2013.