Наука и Образование
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Сетевое научное издание
ISSN 1994-0408

Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. № 02. С. 105–122.

DOI: **10.7463/0216.0832497**

Представлена в редакцию: 23.01.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 621.375

Выбор безопасных для зрения длин волн излучения в УФ и ближнем ИК спектральных диапазонах для задач дистанционного зондирования

Белов М. Л.[1,*], **Городничев В. А.**[1], **Кравцов Д. А.**[1], **Черпакова А. А.**[1]

*belov@bmstu.ru

[1]МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрена задача выбора безопасных для зрения длин волн излучения в УФ и ближнем ИК спектральных диапазонах для дистанционного зондирования. Показано, что выбор наиболее эффективной с точки зрения величины регистрируемого лидарного сигнала и безопасной для зрения длины волны излучения зависит от конкретной задачи лазерного зондирования. Для задачи лазерного зондирования природных образований существенное преимущество имеет длина волны излучения 1,54 мкм в ближнем инфракрасном спектральном диапазоне. Однако, для задачи лазерного аэрозольного зондирования в земной атмосфере длина волны излучения 1,54 мкм в ближнем ИК диапазоне не имеет явного преимущества перед длиной волны излучения 0,355 мкм в ультрафиолетовом спектральном диапазоне.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, безопасная для глаз длина волны излучения, ультрафиолетовый спектральный диапазон

Введение

Лазерные системы дистанционного зондирования предназначены для решения широкого круга задач – экологического мониторинга газовых и аэрозольных загрязнений атмосферы, обнаружения и классификации нефтяных загрязнений на морской поверхности, дистанционного определения оптических характеристик и параметров движения объектов, получения данных о профиле скорости ветра в атмосфере, дистанционного зондирования характеристик земных поверхностей и др. [1-3].

Внедрение лазерных систем дистанционного зондирования связано с определенной опасностью для органов зрения человека [4]. Хотя чувствительность тканей глаза сравнительно мало отличается от чувствительности других тканей, в частности кожи и слизистых оболочек, однако в силу фокусирующих свойств оптической системы глаза плотность излучения на сетчатке резко возрастает. Именно поэтому структуры глаза, и в пер-

вую очередь сетчатка, являются основным критическим органом по отношению к лазерному излучению.

Воздействие лазерного излучения видимого (0,38 – 0,78 мкм) или ближнего инфракрасного (0,78 – 1,4 мкм) диапазонов спектра может вызвать повреждение сетчатки. При повреждении сетчатки легкой степени на глазном дне наблюдается небольшой участок помутневшей сетчатки. В тяжелых случаях имеется участок некроза сетчатки, разрыв ее ткани, возможен выброс участка сетчатки в стекловидное тело. Эти повреждения сопровождаются кровоизлиянием в сетчатку, в пред- или подсетчаточное пространства или стекловидное тело.

Воздействие ультрафиолетового (0,18 – 0,38 мкм) или инфракрасного (>1,4 мкм) лазерного излучения может привести к повреждению роговицы. При повреждении роговицы появляется боль в глазах, спазм век, слезотечение, гиперемия слизистых век и глазного яблока, их отек, отек эпителия роговицы и эрозии. Тяжелые повреждения роговицы сопровождаются помутнением влаги передней камеры.

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 – 1,4мкм [4].

Анализ возможностей лазерного зондирования на различных длинах волн излучения для разных задач мониторинга природной среды и локации в той или иной степени затрагивался в [1,2,5-8] и других работах. Однако, адекватного сравнения возможностей лазерных систем на безопасных для зрения длин волн излучения в УФ и ближнем ИК диапазонах (использующего оптические модели атмосферы, корректно работающие в обоих спектральных диапазонах) не проводилось.

В статье с использованием оптических моделей атмосферы, корректно работающих как в УФ, так и ближнем ИК диапазоне, проводится анализ эффективности использования безопасных для зрения длин волн излучения для широкого круга задач дистанционного зондирования.

1. Постановка задачи

Выбор оптимальной длины волны зондирования во многом определяется конкретной задачей зондирования. Однако, требование безопасности для глаз часто приводит разработчиков лазерных систем к необходимости выбора между УФ (0,18 – 0,38 мкм) и ближним ИК (свыше 1,4 мкм) спектральным диапазонами.

Для лазерных систем, предназначенных для работы в земной атмосфере, возможные спектральные диапазоны сокращаются.

В ближнем ИК спектральном диапазоне возможные длины волн ограничены окнами прозрачности атмосферы 1,5 - 1,8 мкм и 2,1 - 2,4 мкм (в основном из-за поглощения парами воды и углекислым газом). В этих окнах прозрачности возможными лазерными источ-

никами могут быть оптические параметрические генераторы, лазеры на эрбиевом стекле, лазеры на алюмо-иттриевом гранате с легированием гольмием и др.

В УФ спектральном диапазоне из-за сильного поглощения кислородом и озоном реальной альтернативой ближнему ИК диапазону может быть только длина волны 0,355 мкм (третья гармоника лазера на иттрий-алюминиемом гранате, активированном ионами неодима).

В статье проводится выбор безопасных для зрения длин волн излучения в УФ (0,355 мкм) и ближнем ИК (~1,54 и ~2 мкм) спектральных диапазонах с точки зрения ослабления и рассеяния в атмосфере (за счет селективного поглощения газовыми компонентами, молекулярного и аэрозольного рассеяния с использованием оптических моделей атмосферы, корректно работающих в УФ и ближнем ИК диапазонах) и отражения от природных образований для разных задач дистанционного зондирования.

2. Характеристики лазеров в УФ и ближнем ИК диапазонах для задач дистанционного зондирования

В связи с большим разнообразием задач дистанционного зондирования характеристики лазеров также отличаются большим разнообразием. Однако, для большинства задач требуемые лазеры должны иметь энергию в импульсе порядка десятков (хотя бы 10-20) мДж, длительность импульсов – от единиц до 10…20 нс и частоту повторения – десятки или сотни герц.

Для длин волн зондирования 0,355 мкм (УФ диапазон) и ~1,54 и ~2 мкм (ближней ИК диапазон) такие лазеры вполне доступны. В таблицах 1 - 3 приведены примеры таких лазеров [9-20] для частот повторения импульсов 100 Гц и выше.

Таблица 1 Примеры лазерных источников на длине волны 0,355 мкм

Модель лазера и/ или ссылка	**Максимальная частота повторения импульсов, Гц**	**Энергия импульса, мДж**	**Длительность импульса, нс**
TRL-HR 250-100 [9]	100	45	9
TRL-HR 120-200 [9]	200	20	9
LPY702-100 [9]	100	20	10-12
LPY732-200 [9]	200	30	15-18
LPY742-100 [9]	100	90	6-9
LPY742-200 [9]	200	50	8-10
NL230 [10]	100	12	7-9
NL233 [10]	100	35	5-7
LS-2138/100 [11]	100	40	14-16
LS-2149/300 [11]	300	5	12
LS-2149/1k [11]	до 1000	2	12
LQ629 [12]	100	50	9-12

Таблица 2 Примеры лазерных источников на длине волны ~1,54 мкм

Модель лазера и/ или ссылка	**Длина волны, мкм**	**Максимальная частота повторения импульсов, Гц**	**Энергия импульса, мДж**	**Длительность импульса, нс**
Оптические параметрические генераторы на Nd:YAG лазере (на иттрий-алюминиевом гранате с легированием ионами неодима)				
IFL-N5030-OPO [13]	1,57	30	50	7-10
Оптические параметрические генераторы на Nd:YLF лазере (на фториде иттрия-лития с легированием неодимом)				
DP10-OPO [14]	1,5-2,0	100	4	6-10
DP20H-OPO [14]	1,5-2,0	1000	4	6-10
Лазеры на Er:glass (эрбиевое стекло)				
[15]	1,54	1 - 20	7	< 25
[16]	1,54	10,20	10	25
Ми-10 [17]	1,54	10	10-18	25-35

Таблица 3 Примеры лазерных источников на длине волны ~2 мкм

Модель лазера и/ или ссылка	**Длина волны, мкм**	**Максимальная частота повторения импульсов, Гц**	**Энергия импульса, мДж**	**Длительность импульса, нс**
Ho:YAG лазер (на иттрий-алюминиевом гранате с легированием гольмием)				
[18]	2,09 и ,123	2500-10000	14.7	25-55
[19]	2,0907	100	52.5	35.2
AQS [20]	2,09	100 –1000	20	10 - 100
Оптические параметрические генераторы на Nd:YLF лазере (на фториде иттрия-лития с легированием неодимом)				
DP10-OPO [14]	1,5-2,0	100	4	6-10
DP20H-OPO [14]	1,5-2,0	1000	4	6-10

Из таблиц 1-3 видно, что в принципе, подходящие по характеристикам для дистанционного зондирования лазеры (если не принимать во внимание их стоимость, габариты и вес, которые не указаны в таблицах и будут улучшаться для длин волн 1,5-2 мкм по мере развития технологий), можно подобрать как в УФ диапазоне (на длине волны 0,355 мкм), так и в ближнем ИК диапазоне (на длинах волн ~ 1,54 или ~ 2 мкм).

Рассмотрим теперь как эти волны УФ и ближнего ИК диапазона распространяются в приземном слое атмосферы (где в наибольшей степени проявляется поглощение и рассеяние излучения).

3. Молекулярное рассеяние

Явление молекулярного (рэлеевского) рассеяния света достаточно хорошо изучено. В приземном слое атмосферы на длине волны $\lambda = 0{,}55$ мкм величина показателя молекулярного рассеяния $\sigma_{mol}(\lambda = 0{,}55 \;\; ìêì \;\;) = 0{,}0119$ км$^{-1}$.

Зависимость σ_{mol} от длины волны излучения имеет вид [8]:

$$\sigma_{mol}(\lambda) = \sigma_{mol}(\lambda = 0{,}55 \ \ mkm)\left[\frac{0{,}55}{\lambda}\right]^4.$$

Здесь длина волны излучения λ задается в микрометрах.

Значение показателя молекулярного рассеяния на длинах волн 0,355; 0,532; 1,54 и 2,09 мкм и пропускание земной атмосферы для этих длин волн на горизонтальной приземной трассе длиной 1 км приведены в Таблице 4.

Таблица 4 Показатель молекулярного рассеяния

λ, мкм	0,355	0,532	1,54	2,09
$\sigma_{мол}$, км$^{-1}$	6,86 10^{-2}	1,369 10^{-2}	4,1 10^{-4}	5,71 10^{-5}
Пропускание атмосферы	0,934	0,986	0,9998	0,9999

Из приведенной формулы и Таблицы 4 видно, что молекулярное рассеяние максимально (для выбранных длин волн) для длины волны 0,355 мкм в УФ диапазоне и минимально для длин волн 1,54 и 2,09 мкм в ближнем ИК диапазоне. Однако для всех длин волн эта величина близка к единице.

4. Поглощение атмосферными газами

На рисунке 1 схематически изображено поглощение атмосферы с указанием основных поглощающих газов [2].

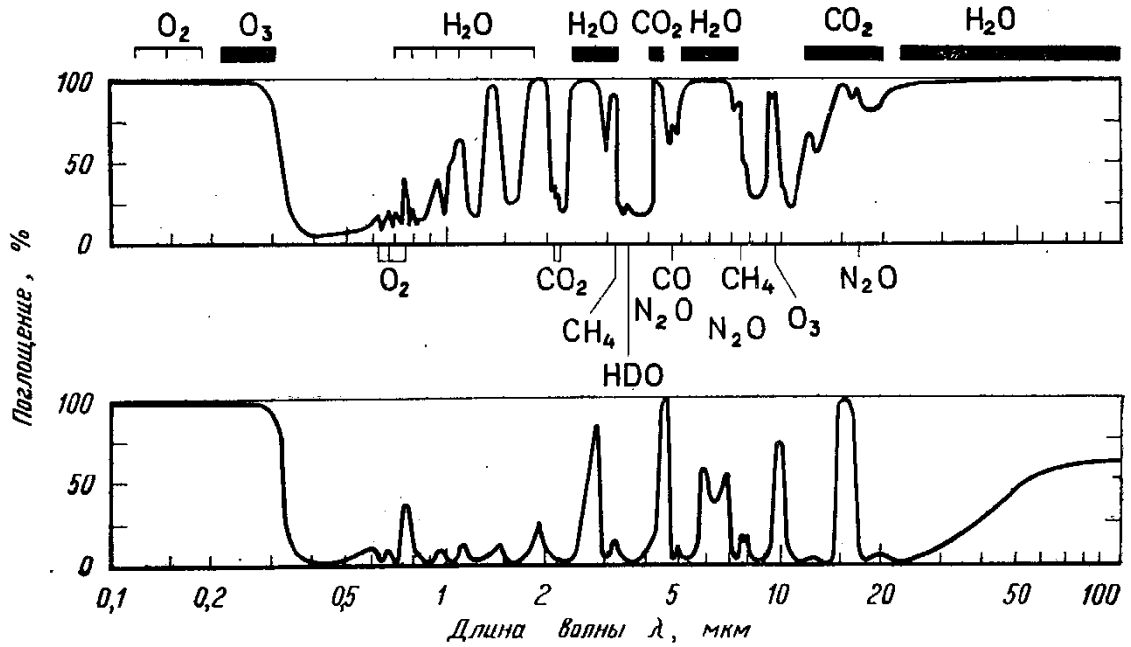

Рисунок 1 - Спектр поглощения земной атмосферы

Верхняя кривая характеризует спектр поглощения солнечного излучения, достигающего поверхности земли. Нижняя получена при тех же условиях, но запись проводилась на высоте 11 км. Положения центров основных полос поглощения атмосферных газов также указаны на рисунке.

Из рисунка видно, что основной вклад в молекулярное поглощение в УФ диапазоне вносят озон и кислород. Кислород имеет интенсивные полосы поглощения в УФ областях 0,17 – 0,19 мкм и 0,24 - 0,26 мкм. Озон сильно поглощает в УФ диапазоне излучение с длиной волны короче 0,32 мкм. На длине волны 0,355 мкм озон также является основной причиной ослабления лазерного излучения за счет молекулярного поглощения, однако ослабление здесь уже не такое сильное (а для длины волны 0,532, для которой поглощение тоже обусловлено озоном, поглощение еще меньше).

На рисунке 2 [8] показана 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 спектральном диапазоне 0,2 – 0,55 мкм.

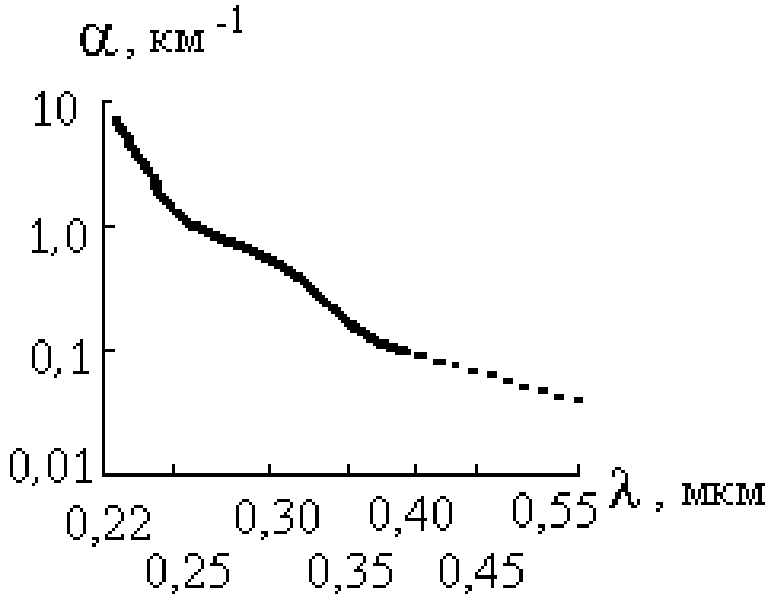

Рисунок 2 - Зависимость показателя ослабления излучения вследствие молекулярного рассеяния и поглощения

В ближней ИК области спектра поглощение излучения происходит за счет паров воды и углекислого газа и лазерное зондирование здесь оказывается возможным лишь в небольших спектральных окнах.

В ближней ИК области спектра земная атмосфера имеет ряд довольно сложный спектр поглощения (см. рис. 3 [21], где приведённая кривая пропускания атмосферы соответствует летним условиям в средних широтах и общему содержанию водяного пара, равному 2 см осаждённой воды).

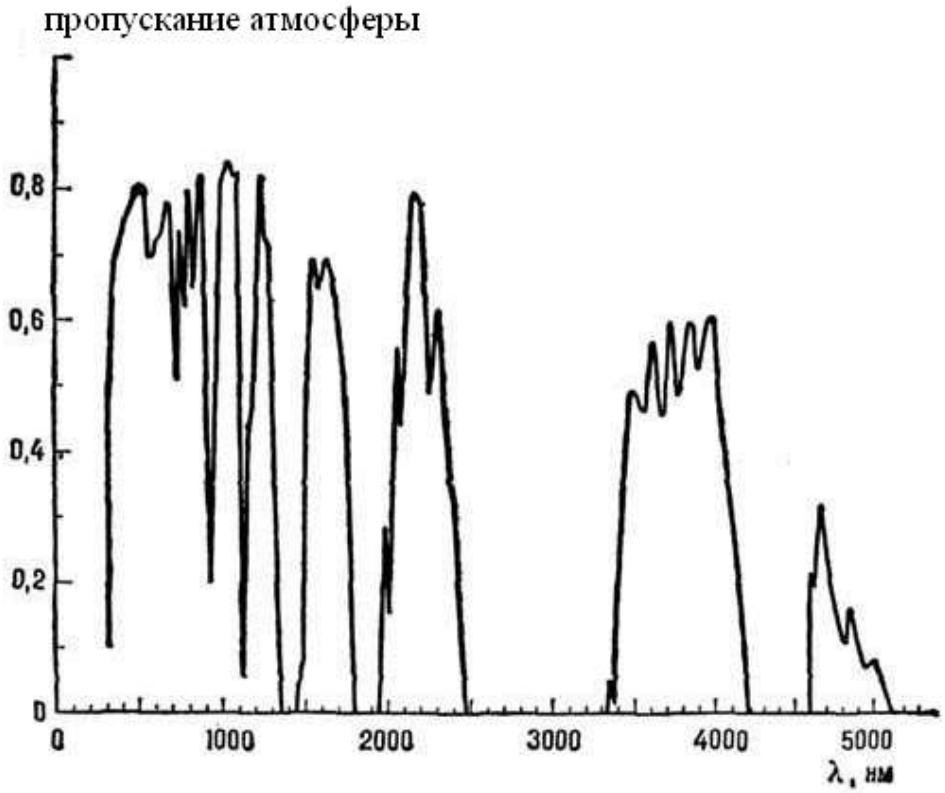

Рисунок 3 – Пропускание атмосферы и видимой и ближней ИК области спектра

Наиболее перспективными длинами волн для лазерной локации являются такие, которые попадают в промежутки между полосами поглощения. Участки спектра с высоким коэффициентом пропускания называют “окнами прозрачности” атмосферы. Наибольшее значение в ближней ИК области имеют “окна прозрачности” в диапазонах 0,95 - 1,06; 1,2 - 1.3; 1,5 - 1,8; 2,1 - 2,4 мкм (рисунок 3)

Пропускание земной атмосферы (за счет молекулярного поглощения и рассеяния) для горизонтальной трассы длиной 1 км в приземном слое приведено в Таблице 5 для длин волн излучения 0,355; 0,532; 1,54 и 2,09 мкм [8,22,23] при большой и средней влажности воздуха (влажность сказывается на пропускание атмосферы только в ближнем ИК).

Таблица 5 Пропускание земной атмосферы (за счет молекулярного поглощения и рассеяния)

λ, мкм	0,355	0,532	1,54	2,09
Пропускание атмосферы (относительная влажность 90%)	0,819	0,951	0,774	0,72
Пропускание атмосферы, (относительная влажность 60%)	0,819	0,951	0,831	0,76

Из таблицы 5 видно, что суммарный эффект молекулярного поглощения и рассеяния не сильно влияет на прохождение излучения как для длины волны 0,355 мкм в УФ диапазоне, так и для длин волн 1,54 и 2,09 мкм в ближнем ИК диапазоне.

5. Аэрозольное рассеяние

Одним из основных факторов ослабления лазерного излучения в земной атмосфере является рассеяние излучения аэрозольными частицами. Однако, данных измерений показателей аэрозольного рассеяния в УФ области спектра мало.

На рисунке 4 приведена зависимость показателя ослабления (км $^{-1}$) на уровне моря от длины волны при разных состояниях земной аэрозольной атмосферы [6] в видимой и ИК области спектра. Стрелками на рисунке показаны длины волн излучения некоторых лазеров.

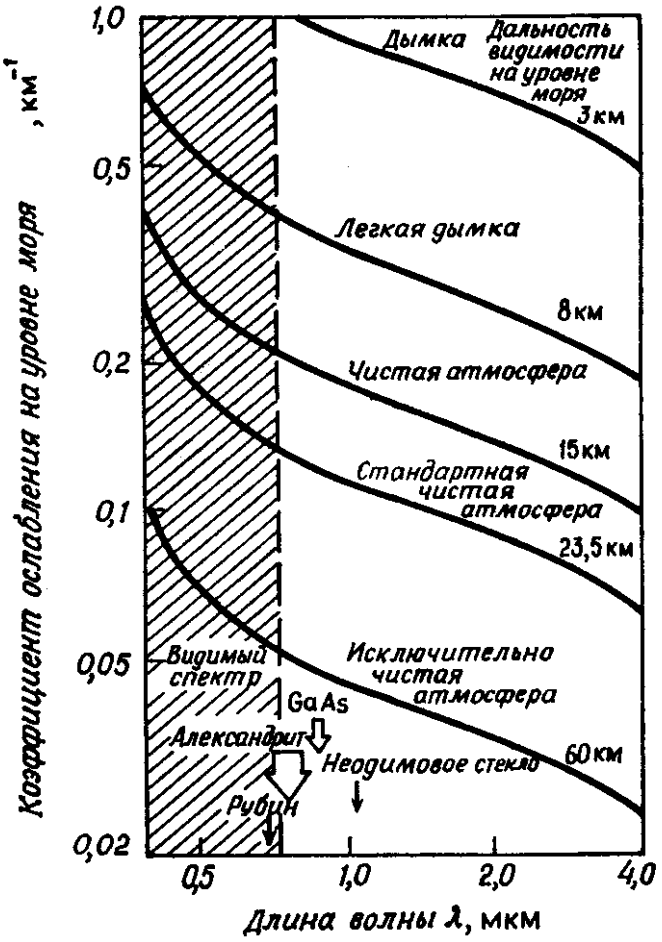

Рисунок 4 - Зависимость показателя ослабления на уровне моря от длины волны при разных атмосферных условий

Из рисунка хорошо видно, что в видимой и ИК области спектра ослабление излучения в земной атмосфере возрастает по мере повышения замутненности атмосферы.

Формулы для оценки показателя аэрозольного ослабления ε тоже приводятся в подавляющем большинстве работ для видимой и ИК области спектра [2].

На основании анализа экспериментальных измерений коэффициента ослабления атмосферы ε выделены три основных периода (зимний, летний и весенне-осенний), внутри

которых свойства атмосферных дымок остаются однотипными. Показатель аэрозольного ослабления ε в условиях атмосферной дымки в видимом и ИК спектральных диапазонах определяется по формуле [2]

$$\varepsilon(\lambda) = \varepsilon(\lambda = 0{,}55)\ [n_o + n_1 \lambda^{-n_2}], \qquad (1)$$

где λ - длина волны излучения; $\varepsilon(\lambda = 0{,}55)$ - показатель аэрозольного ослабления на длине волны 0,55 мкм; n_o, n_1, n_2 - эмпирические коэффициенты.

Формула (1) удобна для практических оценок, так как значение $\varepsilon(\lambda = 0{,}55)$ может быть найдено из выражения:

$$\varepsilon(\lambda = 0{,}55) = \frac{3{,}91}{S_M}, \qquad (2)$$

где S_M - метеорологическая дальность видимости (км).

Наряду с выражением (1) спектральная зависимость показателя ослабления дымок и туманных дымок часто аппроксимируется более грубой, но более удобной формулой [2] (в видимом и ИК спектральных диапазонах):

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{3{,}91}{S_M} \cdot \left(\frac{0{,}55}{\lambda}\right)^{0{,}585\sqrt[3]{S_i}}. \qquad (3)$$

Показатель аэрозольного рассеяния β в условиях атмосферной дымки в видимом и ИК спектральных диапазонах можно оценить по формуле [2]

$$\sigma(\lambda) = \frac{\varepsilon(\lambda)}{1 + \beta(\lambda)}, \qquad (4)$$

где в видимом диапазоне $\beta(\lambda) \approx 0{,}1 \div 0{,}2$; в инфракрасном диапазоне $\beta(\lambda) = (0{,}1 \div 0{,}2)\left(\frac{\lambda}{0.55}\right)^{0{,}8}$.

Значение индикатрисы рассеяния атмосферы $\chi_\pi(\lambda)$ в направлении «назад» можно определить (зная показатель ослабления $\varepsilon(\lambda)$), используя соотношение

$$\chi_\pi(\lambda) = 0{,}33\ \varepsilon^{-0{,}3}(\lambda). \qquad (5)$$

Для сравнительной оценки показателя аэрозольного ослабления ε для длин волн от УФ до ближнего ИК диапазона спектра воспользуемся как формулами (1) – (5), так и имеющимися в научно-технической литературе численными моделями оптических свойств атмосферы (корректно работающими как в УФ, так и ближнем ИК диапазоне).

Значение показателя аэрозольного ослабления на длинах волн 0,355; 0,532; 1,54 и 2,09 мкм и пропускание атмосферы на горизонтальной приземной трассе длиной 1 км приведены в Таблицах 6,7 для двух моделей атмосферы. В Таблице 6 приведены данные для оптико-локационной модели континентального аэрозоля [24] (эта модель соответствует оптическому состоянию атмосферы с метеорологической дальностью видимости ~ 15 км), а в Таблице 7 - приведены данные для американской модели чистой стандартной ат-

мосферы [25] (эта модель соответствует оптическому состоянию атмосферы с метеорологической дальностью видимости ~ 25 км).

Таблица 6 Показатели аэрозольного ослабления для модели [21] континентального аэрозоля

λ, мкм	0,355	0,532	1,54	2,09
Показатель рассеяния, км$^{-1}$	0,337	0,255	0,086	0,054
Пропускание атмосферы	0,741	0,775	0,918	0,947

Таблица 7 Показатели аэрозольного ослабления для модели [22] чистой стандартной атмосферы

λ, мкм	0,355	0,532	1,54	2,09
Показатель рассеяния, км$^{-1}$	0,24	0,16	0,1	0,087
Пропускание атмосферы	0,787	0,852	0,904	0,917

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

Для лазерных систем зондирования природных образований одним из факторов, определяющих величину лидарного сигнала, является коэффициент отражения (альбедо) A земной поверхности.

На сегодняшний день существуют несколько спектральных библиотек с данными по коэффициентам отражения от УФ до средней ИК области спектра. При расчетах использовались данные спектральной библиотеки USGS Digital Spectral Library [26].

На рисунке 5 приведены коэффициенты отражения некоторых минералов, горных пород, грунтов, воды и растительности [26].

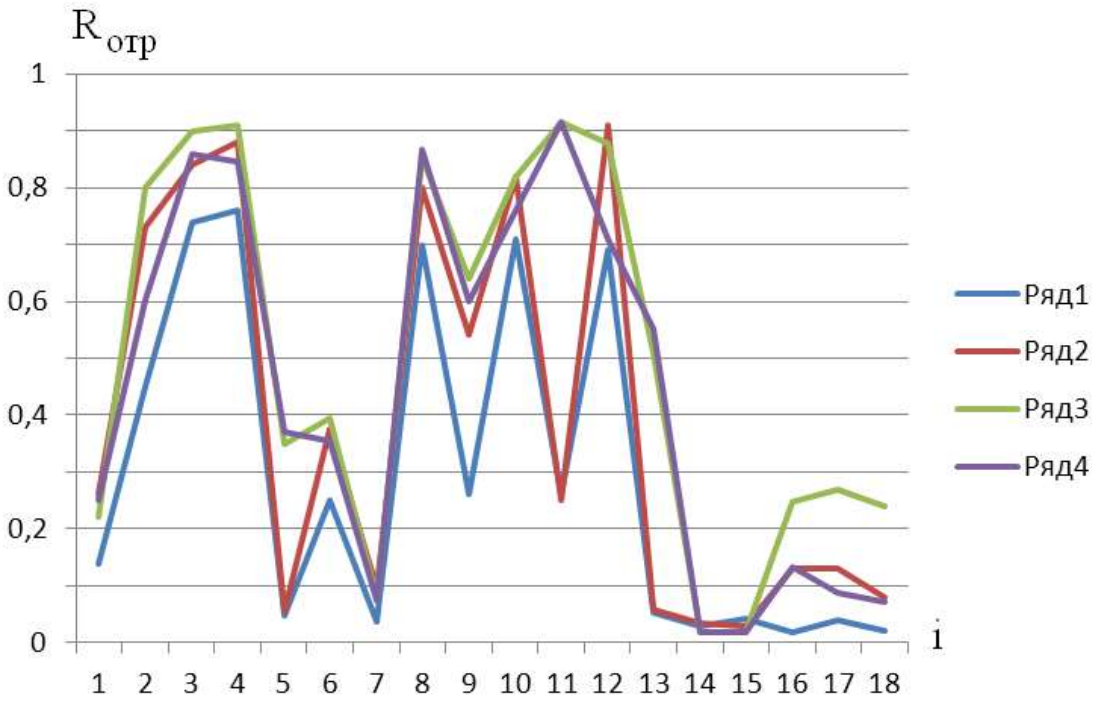

Рисунок 5 – Коэффициенты отражения для разных длин волн

На рисунке 5 ряд 1 соответствует длине волны 0,355 мкм, ряд 2 – 0,532 мкм, ряд 3 – 1,54 мкм, ряд 4 – 2,09 мкм. По оси абсцисс отложены номера объектов отражения, 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.

Из рисунка 5 видно, что значения коэффициентов отражения на длине волны 0,355 мкм в УФ диапазоне несколько ниже значений коэффициентов отражения на длинах волн 1,54 и 2,09 мкм в ближнем ИК диапазоне.

7. Оценка влияния выбора длины волны зондирования на величину регистрируемого сигнала

Величина регистрируемого приемной системой лазерного сигнала зависит от конкретной задачи зондирования. Рассмотрим два наиболее часто встречающихся варианта задач – задачу зондирования природных образований (для которой регистрируемый лазерный сигнал формируется при отражении от земной поверхности) и задачу аэрозольного зондирования (для которой регистрируемый лазерный сигнал формируется при отражении от рассеивающего объема атмосферы).

Для задачи зондирования природных образований формула для мощности лидарного сигнала в прозрачной земной атмосфере имеет вид (для простоты считаем, что земная поверхность плоская ламбертовская, источник и приемник лидара совмещены, искажением формы зондирующего импульса $f(t)$ при отражении от поверхности пренебрегаем) [2]

$$P(\lambda,t) \cong F(\lambda)\frac{P_o\, r_r^2 K_t K_r}{L^2\left(1+\dfrac{\alpha_t^2}{\alpha_r^2}\right)} f(t),$$

где $F(\lambda) = T_a^2(\lambda)A(\lambda)$; $A(\lambda)$ – коэффициент отражения (альбедо) поверхности; L – расстояние от лидара до зондируемой поверхности; α_t, α_r - угол расходимости излучения источника и поле зрения приемной оптической системы, соответственно; P_o – мощность излучения лазерного источника; r_r – радиус приемного объектива; K_t, K_r – коэффициенты пропускания оптических систем передающего и приемного каналов лидара; $T_a(\lambda)$ - коэффициент пропускания атмосферы на трассе «лидар - поверхность».

Для задачи аэрозольного зондирования формула для мощности лидарного сигнала имеет вид (для простоты считаем атмосферу однородной и прозрачной, источник и приемник лидара и их оптические оси совмещены, а длительность зондирующего импульса много меньшей длительности регистрируемого импульса) [2]

$$P(\lambda,t) \cong H(\lambda,z)\frac{P_o\, r_r^2 K_t\, K_r c\tau_s}{8z^2(1+\frac{\alpha_t^2}{\alpha_r^2})},$$

где $H(\lambda,z) = T_a^2(\lambda,z)\chi_\pi(\lambda)\sigma(\lambda)$; $z = \frac{ct}{2}$; τ_s - длительность зондирующего импульса; $\chi_\pi(\lambda)$ – индикатриса рассеяния атмосферы в направлении «назад»; $\sigma(\lambda)$ – объемный коэффициент аэрозольного рассеяния атмосферы; $T_a(\lambda,z)$ - коэффициент пропускания атмосферы на трассе «лидар – рассеивающий объем атмосферы, находящийся на расстоянии z от лидара».

В таблицах 8 и 9 показаны результаты полученных авторами для длин волн 0,355; 0,532; 1,54 и 2,09 мкм оценок величин $F(\lambda)$ и $H(\lambda,z)$, определяющих мощность лидарного сигнала, соответственно, для задачи зондирования природных образований и задачи аэрозольного зондирования (на расстояниях 1 км от объекта зондирования, альбедо природных образований полагалось равным 0,5 независимо от длины волны излучения).

Таблица 8 Значение величины $F(\lambda)$, отн. ед. для задачи зондирования природных образований

λ, мкм	**0,355**	**0,532**	**1,54**	**2,09**
Относительная влажность 90%				
$F(\lambda)$, расчет по формуле (3) с S_M = 3 км	$7{,}7\ 10^{-3}$	0,031	0,1	0,11
$F(\lambda)$, расчет по формуле (3) с S_M = 5 км	0,03	0,09	0,17	0,17
$F(\lambda)$, расчет по формуле (3) с S_M = 10 км	0,086	0,2	0,242	0,23
$F(\lambda)$, модель [21] атмосферы с S_M ~ 15 км	0,18	0,27	0,25	0,24
$F(\lambda)$, модель [22] атмосферы с S_M ~ 25 км	0,21	0,33	0,245	0,22
Относительная влажность 60%				
$F(\lambda)$, расчет по формуле (3) с S_M = 3 км	$7{,}7\ 10^{-3}$	0,031	0,116	0,124
$F(\lambda)$, расчет по формуле (3) с S_M = 5 км	0,03	0,09	0,198	0,191
$F(\lambda)$, расчет по формуле (3) с S_M = 10 км	0,086	0,2	0,279	0,25
$F(\lambda)$, модель [21] атмосферы с S_M ~ 15 км	0,18	0,27	0,291	0,259
$F(\lambda)$, модель [22] атмосферы с S_M ~ 25 км	0,21	0,33	0,282	0,243

Таблица 9 Значение величины $H(\lambda)$, отн. ед. для задачи аэрозольного зондирования

λ, мкм	0,355	0,532	1,54	2,09
Относительная влажность 90%				
$H(\lambda)$, расчет по формуле (3) с S_M = 3 км	$7{,}4\ 10^{-6}$	$2{,}3\ 10^{-5}$	$3{,}6\ 10^{-5}$	$3{,}2\ 10^{-5}$
$H(\lambda)$, расчет по формуле (3) с S_M = 5 км	$2{,}1\ 10^{-5}$	$4{,}7\ 10^{-5}$	$3{,}8\ 10^{-5}$	$3{,}0\ 10^{-5}$
$H(\lambda)$, расчет по формуле (3) с S_M = 10 км	$4{,}1\ 10^{-5}$	$6{,}5\ 10^{-5}$	$2{,}8\ 10^{-5}$	$1{,}9\ 10^{-5}$
$H(\lambda)$, модель [21] атмосферы с S_M ~ 15 км	$6{,}3\ 10^{-3}$	$7{,}5\ 10^{-3}$	$2{,}9\ 10^{-3}$	$1{,}9\ 10^{-3}$
$H(\lambda)$, модель [22] атмосферы с S_M ~ 25 км	$5{,}6\ 10^{-3}$	$6{,}5\ 10^{-3}$	$3{,}2\ 10^{-3}$	$2{,}5\ 10^{-3}$
Относительная влажность 60%				
$H(\lambda)$, расчет по формуле (3) с S_M = 3 км	$7{,}4\ 10^{-6}$	$2{,}3\ 10^{-5}$	$4{,}1\ 10^{-5}$	$3{,}5\ 10^{-5}$
$H(\lambda)$, расчет по формуле (3) с S_M = 5 км	$2{,}1\ 10^{-5}$	$4{,}7\ 10^{-5}$	$4{,}4\ 10^{-5}$	$3{,}3\ 10^{-5}$
$H(\lambda)$, расчет по формуле (3) с S_M = 10 км	$4{,}1\ 10^{-5}$	$6{,}5\ 10^{-5}$	$3{,}2\ 10^{-5}$	$2{,}1\ 10^{-5}$
$H(\lambda)$, модель [21] атмосферы с S_M ~ 15 км	$6{,}3\ 10^{-3}$	$7{,}5\ 10^{-3}$	$3{,}4\ 10^{-3}$	$2{,}1\ 10^{-3}$
$H(\lambda)$, модель [22] атмосферы с S_M ~ 25 км	$5{,}6\ 10^{-3}$	$6{,}5\ 10^{-3}$	$3{,}7\ 10^{-3}$	$2{,}7\ 10^{-3}$

Результаты расчетов в таблицах 8 и 9 показывают, что выбор наиболее эффективной (с точки зрения величины регистрируемого лидарного сигнала) и безопасной для зрения длины волны излучения сильно зависит от задачи зондирования.

Для задачи зондирования природных образований из безопасных для зрения длин волн существенное преимущество (по энергетическим характеристикам лидарного сигнала) имеет длина волны 1,54 мкм в ближнем ИК диапазоне.

Однако, для задачи аэрозольного зондирования длина волны 1,54 мкм в ближнем ИК диапазоне не имеет явного преимущества (перед длиной волны 0,355 мкм в УФ диапазоне): в прозрачной атмосфере (с метеорологической дальностью видимости 10 км и более) явное преимущество имеет длина волны 0,355 мкм, но в дымках (с метеорологической дальностью видимости 5 км и менее) явное преимущество имеет длина волны 1,54 мкм.

Выводы

В статье с использованием оптических моделей атмосферы, корректно работающих как в УФ, так и ближнем ИК диапазоне, проведен анализ эффективности использования безопасных для зрения длин волн излучения для широкого круга задач дистанционного зондирования. Впервые показано, что выбор наиболее эффективной с точки зрения величины регистрируемого лидарного сигнала и безопасной для зрения длины волны излучения зависит от конкретной задачи лазерного зондирования. Для задачи лазерного зондирования природных образований существенное преимущество имеет длина волны излуче-

ния 1,54 мкм в ближнем инфракрасном спектральном диапазоне. Однако, для задачи лазерного аэрозольного зондирования в земной атмосфере длина волны излучения 1,54 мкм в ближнем ИК диапазоне не имеет явного преимущества перед длиной волны излучения 0,355 мкм в ультрафиолетовом спектральном диапазоне.

Список литературы

1. Карасик В.Е., Орлов В.М. Лазерные системы видения. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 478 с.
2. 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.
3. Федотов Ю.В., Матросова О.А., Белов М.Л., Городничев В.А. Метод классификации нефтяных загрязнений на земной поверхности, основанный на регистрации флуоресцентного излучения в пяти узких спектральных диапазонах // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 08. С. 739-742.
4. ГОСТ 31581-2012. Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий. М.: Стандартинформ, 2013. 24 с.
5. Матвиенко Г.Г., Заде Г.О., Фердинандов Э.С., Колев И.Н., Аврамова Р.П. Корреляционные методы лазерно-локационных измерений скорости ветра. Новосибирск: Наука, 1985. 223 с.
6. Measures R.M. Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications. Malabar, Florida: Krieger Publishing Company, 1992. 510 p.
7. Городничев В.А., Белов М.Л., Иванов С.Е., Филимонов П.А., Кувшинов А.В. Оценка дальности обнаружения лидаром сдвига ветра на разных высотных уровнях в тропосфере // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 6. С. 232-246. DOI: 10.7463/0614.0715345
8. 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.
9. Litron Lasers: website. Режим доступа: http://www.litronlasers.com/ (дата обращения 02.12.2015).
10. EKSPLA: website. Режим доступа: http://www.ekspla.com/products (дата обращения 02.12.2015).
11. LOTIS TII: website. Режим доступа: http://www.lotis-tii.com/rus/index.php (дата обращения 02.12.2015).
12. SOLAR LASER SYSTEMS: website. Режим доступа: http://solarlaser.com/ru/ (дата обращения 02.12.2015).
13. СМ-Лазер: сайт. Режим доступа: http://sm-laser.by/ifl-n5030-opo/ (дата обращения 02.12.2015).

14. OPO Series // Nanointek: website. Режим доступа: http://www.nanointek.ru/assets/files/OPO.pdf (дата обращения 02.12.2015).
15. Оптика лазеров. 1.5 мкм частотный лазер на эрбиевом стекле с диодной накачкой // Npkgoi: сайт. Режим доступа: http://www.npkgoi.ru/?module=articles&c=profil&b=14&a=1 (дата обращения 02.12.2015).
16. Лазеры и оптические системы: сайт. Режим доступа: http://www.los.su/ru/produktsiya.html (дата обращения 02.12.2015).
17. ЛОМО: сайт. Режим доступа: http://www.lomo.ru/site/index.php?ct=0 (дата обращения 02.12.2015).
18. Захаров Н.Г., Антипов О.Л., Шарков В.В., Савикин А.П. Эффективная генерация на длине волны 2,1 мкм в лазере на кристалле Ho: YAG с накачкой излучением Tm: YLE-лазера // Квантовая Электроника. 2010. Т. 40, № 2. С. 98-100. Режим доступа: http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=qe&paperid=14258&option_lang=rus (дата обращения 02.12.2015).
19. Дуань С.М., Цуй Ц., Ли Л.Ц., Дай Т.Й., Юй К.К., Яо Б.Ц. Ho: YAG-лазер с двухсторонней накачкой и высокой выходной энергией // Квантовая Электроника. 2015. Т. 45, № 8. С. 701-703. Режим доступа: http://www.quantum-electron.ru/php/paper_rus.phtml?journal_id=qe&paper_id=15571 (дата обращения 02.12.2015).
20. AQS Ho: YAG SERIES // IPG PHOTONICS: website. Режим доступа: http://www.ipgphotonics.com/Collateral/Documents/English-US/AQS%20HoYAG_IPG_datasheet.pdf (дата обращения 02.12.2015).
21. Прозрачность земной атмосферы // Bourabai.kz: сайт. Режим доступа: http://www.bourabai.kz/physics/3115.html (дата обращения 02.12.2015).
22. Тымкул Л.В., Тымкул В.М. Системы инфракрасной техники. Новосибирск: СГГА, 2011. 40 с.
23. Теория теплового излучения и прохождение излучения через атмосферу // Электрические сети: сайт. Режим доступа: http://leg.co.ua/arhiv/raznoe-arhiv/sistemy-teplovideniya-6.html (дата обращения 02.12.2015).
24. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. Новосибирск: Наука, 1982. 198 с.
25. Handbook of Geophysics and space environment / ed. by S.B. Valley. AFCRL, US Airforce, 1965.
26. USGS Digital Spectral Library 06 // USGS: website. Режим доступа: http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06 (дата обращения 02.12.2015).

Science & Education of the Bauman MSTU
Electronic journal
ISSN 1994-0408

Science and Education of the Bauman MSTU, 2016, no. 02, pp. 105–122.

DOI: **10.7463/0216.0832497**

Received: 23.01.2016

© Bauman Moscow State Technical Unversity

Choice of Eye-Safe Radiation Wavelength in UV and Near IR Spectral Bands for Remote Sensing

M.L. Belov[1,*], V.A. Gorodnichev[1], D.A. Kravtsov[1], A.A. Cherpakova[1]

*belov@bmstu.ru

[1]Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: remote sensing, eye-safe radiation wavelength; ultraviolet spectral band, near infrared spectral band

The introduction of laser remote sensing systems carries a particular risk to the human's sense of vision. A structure of the eye, and especially the retina, is the main critical organ as related to the laser radiation.

The work uses the optical models of the atmosphere, correctly working in both the UV and the near-IR band, to select the eye-safe radiation wavelengths in the UV (0.355 m) and near-IR (~ 1.54 and ~ 2 m) spectral bands from the point of view of recorded lidar signal value to fulfill the tasks of laser sensing the natural formations and laser aerosol sensing in the atmosphere.

It is shown that the remote sensing lasers with appropriate characteristics can be selected both in the UV band (at a wavelength of 0.355 μm) and in the near-IR band (at wavelengths of 1.54 ~ or ~ 2 μm).

Molecular scattering has its maximum (for the selected wavelength) at a wavelength of 0.355 μm in the UV band, and the minimum at the wavelengths of 1.54 and 2.09 μm in the near -IR band. The main contribution to the molecular absorption at a wavelength of 0.355 μm is made by ozone. In the near-IR spectral band the radiation is absorbed due to water vapor and carbon dioxide.

Calculations show that the total effect of the molecular absorption and scattering has no influence on radiation transmission for both the wavelength of 0.355 μm in the UV band, and the wavelengths of 1.54 and 2.09 μm in the near-IR band for sensing trails ~ 1 km.

One of the main factors of laser radiation attenuation in the Earth's atmosphere is radiation scattering by aerosol particles.

The results of calculations at wavelengths of 0.355 μm, 1.54 μm and 2.09 μm for the several models of the atmosphere show that a choice of the most effective (in terms of the recorded signal of lidar) and eye-safe radiation wavelength depends strongly on the task of sensing.

To fulfill the task of laser sensing the natural formations, among the eye-safe wavelengths there is one significantly advantageous, i.e. the wavelength of 1.54 μm in the near-IR band.

However, as to the problem of aerosol sensing in the atmosphere, the wavelength of 1.54 μm in the near-IR region has no a distinct advantage over the wavelength of 0.355 μm in the UV band.

References

1. Karasik V.E., Orlov V.M. *Lazernye sistemy videniya* [Laser vision systems]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2013. 478 p. (in Russian).
2. Kozintsev V.I., Belov M.L., Orlov V.M., Gorodnichev V.A., Strelkov B.V. *Osnovy impul'snoi lazernoi lokatsii* [Basics of pulsed laser ranging]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2010. 572 p. (in Russian).
3. Fedotov Yu.V., Matrosova O.A., Belov M.L., Gorodnichev V.A. Method of classification of oil pollution on ground surface based on fluorescence radiation recording within five narrow spectral bands. *Optika atmosfery i okeana = Atmospheric and oceanic optics,* 2014, vol. 27, no. 08, pp. 739-742. (in Russian).
4. GOST 31581-2012. Lazernaya bezopasnost'. Obshchie trebovaniya 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. 24 p. (in Russian).
5. Matvienko G.G., Zade G.O., Ferdinandov E.S., Kolev I.N., Avramova R.P. *Korrelyatsionnye metody lazerno-lokatsionnykh izmerenii skorosti vetra* [Correlation methods of laser-radar measurements of wind speed]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985. 223 p. (in Russian).
6. Measures R.M. *Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications.* Malabar, Florida, Krieger Publishing Company, 1992. 510 p.
7. Gorodnichev V.A., Belov M.L., Ivanov S.E., Filimonov P.A., Kuvshinov A.V. Estimating a Wind Shear Detection Range for Different Altitude Levels in the Troposphere. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2014, no. 6, pp. 232-246. DOI: 10.7463/0614.0715345 (in Russian).
8. Kozintsev V.I., Belov M.L., Gorodnichev V.A., Strelkov B.V. *Raschet yarkosti fona i oslableniya lazernogo izlucheniya v ul'trafioletovoy oblasti spectra* [Calculation of background luminance and laser attenuation in ltraviolet region of spectrum]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2011. 66 p. (in Russian).
9. Litron Lasers: website. Available at: http://www.litronlasers.com/ , accessed 02.12.2015.
10. EKSPLA: website. Available at: http://www.ekspla.com/products , accessed 02.12.2015.
11. LOTIS TII: website. Available at: http://www.lotis-tii.com/rus/index.php , accessed 02.12.2015. (in Russian).
12. SOLAR LASER SYSTEMS: website. Available at: http://solarlaser.com/ru/ , accessed 02.12.2015. (in Russian).
13. CM-Laser: website. Available at: http://sm-laser.by/ifl-n5030-opo/ , accessed 02.12.2015. (in Russian).

14. *OPO Series.* Nanointek: website. Available at: http://www.nanointek.ru/assets/files/OPO.pdf , accessed 02.12.2015. (in Russian).
15. *Optika lazerov. 1.5 mkm chastotnyi lazer na erbievom stekle s diodnoi nakachkoi* [Optics of lasers. 1.5 micron frequency laser on erbium glass diode Pumped]. Npkgoi: website. Available at: http://www.npkgoi.ru/?module=articles&c=profil&b=14&a=1 , accessed 02.12.2015.
16. Lasers and optical systems: website. Available at: http://www.los.su/ru/produktsiya.html , accessed 02.12.2015. (in Russian).
17. LOMO: website. Available at: http://www.lomo.ru/site/index.php?ct=0 , accessed 02.12.2015. (in Russian).
18. Zakharov N.G., Antipov O.L., Sharkov V.V., Savikin A.P. Efficient lasing at 2.1 μm in a Ho:YAG laserpumped by a Tm:YLF laser. *Kvantovaya Elektronika = Quantum Electronics*, 2010, vol. 40, no. 2, pp. 98-100. Available at: http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=qe&paperid=14258&option_lang=rus , accessed 02.12.2015. (in Russian).
19. Duan' S.M., Tsui Ts., Li L.Ts., Dai T.I., Yui K.K., Yao B.Ts. A dual-end-pumped Ho:YAG laser with a high energy output. *Kvantovaya Elektronika = Quantum Electronics*, 2015, vol. 45, no. 8, pp. 701-703. Available at: http://www.quantum-electron.ru/php/paper_rus.phtml?journal_id=qe&paper_id=15571 , accessed 02.12.2015. (in Russian).
20. *AQS Ho: YAG SERIES.* IPG PHOTONICS: website. Available at: http://www.ipgphotonics.com/Collateral/Documents/English-US/AQS%20HoYAG_IPG_datasheet.pdf , accessed 02.12.2015.
21. *Prozrachnost' zemnoi atmosfery* [The transparency of the earth's atmosphere]. Bourabai.kz: website. Available at: http://www.bourabai.kz/physics/3115.html , accessed 02.12.2015. (in Russian).
22. Tymkul L.V., Tymkul V.M. *Sistemy infrakrasnoi tekhniki* [Systems of infrared technics]. Novosibirsk, SGGA Publ., 2011. 40 p. (in Russian).
23. *Teoriya teplovogo izlucheniya i prokhozhdenie izlucheniya cherez atmosferu* [The theory of thermal radiation and passing radiation through the atmosphere]. Electric networks: website. Available at: http://leg.co.ua/arhiv/raznoe-arhiv/sistemy-teplovideniya-6.html , accessed 02.12.2015. (in Russian).
24. Krekov G.M., Rakhimov R.F. *Optiko-lokatsionnaya model' kontinental'nogo aerozolya* [Optical-radar model of continental aerosol]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1982. 198 p. (in Russian).
25. Valley S.B., ed. *Handbook of Geophysics and Space Environment*. Air Force Cambridge Research Laboratories, US, 1965.
26. *USGS Digital Spectral Library 06*. USGS: website. Available at: http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06 , accessed 02.12.2015.