

О.И. Смоктий

ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ, МОЛЕКУЛЯРНО-АЭРОЗОЛЬНОГО РАССЕЯНИЯ И ПАРАМЕТРОВ БОРТОВОЙ ОПТИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ НА КАЧЕСТВО СПУТНИКОВОЙ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ ПРИ СЪЕМКЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

Смоктий О.И. Влияние атмосферной турбулентности, молекулярно-аэрозольного рассеяния и параметров бортовой оптической аппаратуры на качество спутниковой видеоинформации при съемке Земли из космоса.

Аннотация. Рассмотрена актуальная проблема совместного влияния развитой атмосферной турбулентности, рассеивающей молекулярно-аэрозольной атмосферы и параметров бортовой оптической аппаратуры на качество спутниковой многоспектральной видеоинформации о природной среде, получаемой при дистанционном зондировании Земли из космоса в видимой области спектра $\lambda=400-850\text{нм}$. Представленные результаты получены в рамках теории динамических систем и Фурье-преобразований линейных оптических сигналов. При анализе указанной проблемы использованы репрезентативные данные о вертикальной зависимости структурной функции атмосферной турбулентности, характеристиках бортовой оптической аппаратуры и параметрах пространственно-частотной фильтрации космической видеоинформации, определяемых многократным некогерентным рассеянием солнечных фотонов в подсистеме «молекулярно-аэрозольная атмосфера Земли – горизонтально-неоднородная подстилающая поверхность». Рассчитаны соответствующие передаточные функции и частотно-контрастные характеристики общего комплексного оптического канала. Показано, что в этом случае качество космических изображений и спектров яркости наземных (надводных) объектов среднего ($\Delta\sim 10-10^2\text{м}$) и низкого ($\Delta\sim 10^3-10^6\text{м}$) пространственного разрешения практически не зависит от атмосферной турбулентности. При этом ее влияние по сравнению с многократным некогерентным молекулярно-аэрозольным рассеянием и бортовым оптическим регистратором наиболее существенно только для наиболее высокочастотных и мелко-масштабных фрагментов космических изображений ($\Delta\ll 10\text{м}$).

Ключевые слова: функция рассеяния, атмосферная турбулентность, молекулярно-аэрозольное рассеяние, бортовой оптический прибор, пространственно-частотное разрешение, линейная оптическая система, оптическая передаточная функция, Фурье-преобразование, структурная функция турбулентности, флуктуации показатели преломления, атмосферный пространственно-частотный фильтр, наземная мирра, пороговая пространственная частота, прямая и диффузная прозрачности атмосферы.

Smokty O.I. Influence of turbulent atmosphere, molecular-aerosol scattering and on-board optical devices' parameters on the satellite video data quality at the Earth's remote sensing from space.

Abstract: Topic issue of conjoint influence of developed atmospheric turbulence, molecular-aerosol light scattering and on-board optical devices parameters on the multispectral satellite environmental video data's quality obtained at the Earth's remote sensing from space in the visual spectral field $\lambda = 400-850\text{nm}$ is considered. Given results are obtained in the framework of both dynamic systems theory and Fourier transformations of the linear optical signals. While analyzing above-considered problem, the representative data concerning vertical dependence of atmospheric turbulence structural function, on-board optical devices characteristics and space video data spatial-frequency filtration parameters determined by multiple non-coherent scatter-

ing of solar photons in the subsystem “the Earth’s molecular-aerosol atmosphere – horizontal and non-uniform underlying surface” have been made used. Both proper transfer functions and frequency-contrast characteristics of general complex optical channel are calculated. For this particular case, is demonstrated that the quality of the both space images and ground-based/water-based objects brightness spectra of medium spatial resolution ($\Delta \sim 10 - 10^2$ m) and low spatial resolution ($\Delta \sim 10^3 - 10^4$ m), basically, does not depend on the atmospheric turbulence. At that, the above-mentioned turbulence influence emerges, essentially, for the mostly high-frequency and low-scale space images fragments ($\Delta \ll 10$ m) only in comparison with the results obtained from both multiple non-coherent molecular-aerosol scattering and on-board optical recording device.

Keywords: scattering function, atmospheric turbulence, molecular-aerosol scattering, on-board optical device, spatial-frequency permission, linear optical system, optical transfer function, Fourier transformation, structural turbulence function, refraction index fluctuation, atmospheric spatial-frequency filter, landed myrra, threshold spatial frequency, direct and diffuse atmospheric transparency.

1. Введение. Проблема пространственно-частотной атмосферной коррекции спутниковой многоспектральной видеоинформации, получаемой при дистанционном зондировании Земли из космоса, имеет принципиально важное значение для решения таких прикладных задач, как селекция, распознавание и количественная оценка параметров состояния наземных (надводных) объектов природного и техногенного происхождения [1-3]. Трудности исследования этой проблемы обусловлены необходимостью предварительного решения ряда фундаментальных физических и математических проблем, связанных, в первую очередь, с проведением численного имитационного моделирования совместных, но независимых процессов атмосферной турбулентности и многократного некогерентного рассеяния солнечных фотонов в системе «атмосфера-объект-фон» при наличии на борту космического носителя регистрирующей оптической аппаратуры [4-6]. Дополнительная сложность решения указанной проблемы состоит в том, что учет влияния турбулентной рассеивающей молекулярно-аэрозольной атмосферы, расположенной между спектрофотометрируемым наземным (надводным) объектом и бортовым регистрирующим прибором, определяется сложными многопараметрическими процессами, имеющими различную физическую природу и пространственно-временные масштабы, несопоставимые характеристики и базовые параметры состояния [7]. Естественно, что для адекватного описания этих независимых процессов даже в рамках единого формализма теории линейных динамических систем и преобразований оптических сигналов необходим достаточно сложный математический аппарат, основанный на использовании различных приближенных методов и алгоритмов [8-10].

В условиях развитой атмосферной турбулентности распространение электромагнитных волн в случайно-неоднородной турбулентной среде определяется когерентным многократным рассеянием солнечных фотонов на пространственно-временных флуктуациях ее показателя преломления, который зависит от температуры, давления и упругости водяных паров атмосферного воздуха [11]. С другой стороны, влияние молекулярно-аэрозольной компоненты земной атмосферы на качество спектральной спутниковой видеоинформации о природной среде обусловлено, в основном, некогерентным многократным рассеянием на флуктуациях плотности молекулярной составляющей атмосферного воздуха (рэлеевское рассеяние) и независимо на взвешенных полидисперсных неоднородных частицах естественного и антропогенного происхождения (аэрозольное рассеяние) [12, 13].

С математической точки зрения учет искажающего радиационного влияния атмосферной турбулентности на качество многоспектральной космической съемки Земли сводится к численному решению уравнений классической электродинамики (уравнений Максвелла) в том или ином приближении для сред со случайным распределением флуктуаций ее показателя преломления [14]. При этом статистика и вероятностные распределения указанных флуктуаций факторизуются в таком базовом имитационном параметре, каким является структурная функция турбулентности [15].

В свою очередь, некогерентное многократное рассеяние солнечных фотонов на молекулах и аэрозольных полидисперсных частицах при определенных и разумных физических предположениях, а также при отсутствии фазовых искажений оптических сигналов может рассматриваться как диффузный перенос излучения (вероятностная цепь Маркова) в атмосфере, ограниченной снизу подстилающей поверхностью [16]. При этом пространственно-угловое и спектральное распределения излучения, многократно рассеянного атмосферой и переотраженного горизонтально-неоднородной подстилающей поверхностью, определяются точными или приближенными решениями краевых задач классической теории переноса солнечных фотонов при соответствующих условиях на верхней и нижней границах атмосферного слоя (см., например, [13]).

Что касается чисто прикладного аспекта данной проблемы, то применительно к рассматриваемой задаче он состоит в необходимости учета и численного моделирования искажающего фильтрующего

влияния рассеивающей и поглощающей турбулентной молекулярно-аэрозольной атмосферы на пространственно-частотное, угловое и спектральное разрешения регистрирующей спутниковой оптической аппаратуры, формирующей в конечном итоге спектрофотометрические образы наземных (надводных) объектов при их съемке из космоса [17]. В этой связи важное значение для их последующей автоматизированной обработки, анализа и тематической интерпретации имеет не только совместный учет атмосферной турбулентности и некогерентного многократного рассеяния на молекулах и аэрозольных частицах, но и численное имитационное моделирование селективного влияния, которое оказывают параметры спектрального многоканального бортового регистрирующего прибора. При этом ухудшение качества космических изображений и спектров яркости природных образований даже при совершенной оптике бортовой регистрирующей аппаратуры, как правило, не связано с дифракционным пределом ее пространственно-углового разрешения [18]. Например, при малой апертуре бортового оптического прибора оно определяется, в основном, случайными перемещениями изображения объекта в фокальной плоскости линзы, где формируется само изображение [19]. Однако в случае большой апертуры и высоком пространственно-угловом разрешении оптической аппаратуры именно развитая атмосферная турбулентность обуславливает появление в видимой области спектра ($\lambda=400-850$ нм) при коротких экспозициях съемки эффектов расплывание «изображений и характерной пятнистой» структуры в виде «спеклов» их яркостей [20].

Как следствие, проблема построения количественных имитационных моделей, учитывающих влияние всех указанных выше разноплановых факторов на конечные результаты первичной и межотраслевой обработки спутниковой видеoinформации, требует для своего решения комплексного и системного подхода. Ниже используется именно такой подход [21], основанный на едином формализованном описании отдельных составляющих спектрального оптического канала дистанционного зондирования Земли. Такой подход позволяет с помощью понятий оптических передаточных функций и частотно-контрастных характеристик (ЧКХ) комплексной динамической системы построить репрезентативные численные модели пространственно-частотного фильтра турбулентной молекулярно-аэрозольной атмосферы при учете параметров спутниковой оптической аппаратуры.

Схематическое представление комплексной оптической системы, формирующей спутниковые изображения и спектры яркостей

природных и техногенных образований при дистанционном зондировании Земли из космоса, дано на рисунке 1.

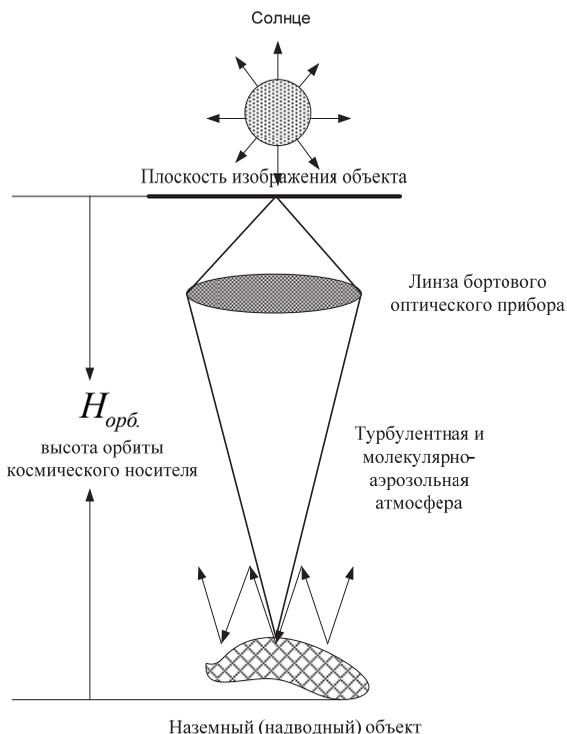


Рис. 1. Схематическое представление комплексной оптической системы, формирующей изображения и спектры яркостей природных объектов при съемке Земли из космоса

Таким образом, прохождение солнечного излучения, отраженного от зондируемого природного или техногенного объекта в направлении бортовой регистрирующей аппаратуры, а затем распространяющегося в обратном направлении к наземному центру приема и обработки спутниковой информации, рассматривается как единый процесс пространственно-частотной фильтрации оптических сигналов не только самим бортовым прибором и турбулентной атмосферой, но и многократно рассеивающей и поглощающей молекулярно-аэрозольной атмосферой, ограниченной снизу произвольным горизонтально-неоднородным отражающим дном.

2. Структурные теоретические модели комплексной оптической системы дистанционного зондирования Земли из космоса.

Будем считать, что турбулентная компонента комплексной оптической системы атмосферы, расположенной между спектрофотометрируемым из космоса наземным (надводным) объектом и бортовым регистрирующим прибором, формируется протяженной случайно-неоднородной средой с плавными и достаточно слабыми пространственно-временными флюктуациями ее показателя преломления.

Другая важная компонента этой системы определяется некогерентным многократным рассеянием солнечных фотонов на флюктуациях плотности молекулярной атмосферы (рэлеевское рассеяние) и присутствующих в ней взвешенных полидисперсных частицах в условиях их неплотной упаковки и малого размера по сравнению с длиной волны λ падающего излучения (аэрозольное рассеяние). Кроме того, в обоих случаях необходимо принимать во внимание наличие отражающей подстилающей поверхности, расположенной на уровне нижней границы молекулярно-аэрозольной атмосферы.

Параметры бортовой оптической аппаратуры, формирующей в конечном итоге многоспектральные спутниковые изображения зондируемых объектов, определяют третью базовую компоненту указанной комплексной системы.

Используем далее для построения структурных теоретических моделей линейной динамической системы, определяемой когерентным рассеянием солнечных фотонов турбулентной атмосферой и независимо некогерентным многократным рассеянием молекулярно-аэрозольной атмосферой при учете влияния параметров бортовой оптической аппаратуры, основные положения теории линейных систем и преобразований в оптике [22]. Опуская для простоты дальнейшего рассмотрения угловые и спектральные зависимости моделируемых полей излучения, рассмотрим наземный самосветящийся 2-D объект в виде мирры с пространственным распределением монохроматической яркости $I(x', y')$ в плоскости, перпендикулярной направлению ее визирования из космоса. Тогда в плоскости изображения $D(x, y)$ спутникового оптического прибора распределение яркости $I(x, y)$ данного объекта, наблюдаемого сквозь атмосферу Земли, можно представить в следующем виде:

$$I(x, y) = \iint I_0(x', y') S(x - x', y - y') dx' dy', \quad (1)$$

где $x = qx'$, $y = qy'$, а q -линейное увеличение изображения, обусловленное комплексной оптической системой. Функция $S(x, y)$ описыва-

ет физические процессы, формирующие 2-D изображение наземного объекта на выходе этой системы при наличии совокупности точечных источников излучения на ее входе. При этом количественное описание процесса передачи пространственных частот ν_x и ν_y исходного изображения объекта можно получить, осуществляя двухмерное преобразование Фурье его спектральных яркостей $I_0(x, y)$ на входе и $I(x, y)$ выходе рассматриваемой комплексной линейной оптической системы, а именно:

$$\hat{I}(\nu_x, \nu_y) = \iint_{-\infty}^{+\infty} I(x, y) e^{-2\pi i(\nu_x x + \nu_y y)} dx dy, \quad (2)$$

$$\hat{I}_0(\nu_x, \nu_y) = \iint_{-\infty}^{+\infty} I_0(x, y) e^{-2\pi i(\nu_x x + \nu_y y)} dx dy. \quad (3)$$

Выполняя затем 2-D преобразование Фурье функции рассеяния $S(x, y)$, получаем основное соотношение, связывающее эту функцию с передаточной функцией комплексной оптической системы $\hat{P}(\nu_x, \nu_y)$:

$$\hat{P}(\nu_x, \nu_y) = \hat{S}(\nu_x, \nu_y) = \iint_{-\infty}^{+\infty} S(x, y) e^{-2\pi i(\nu_x x + \nu_y y)} dx dy. \quad (4)$$

Учитывая (2)-(4) и используя классическую теорему о свертке функций [22], вместо (1) имеем известное базовое соотношение, связывающее Фурье-преобразования изображений на входе $\hat{I}_0(x, y)$ и выходе $\hat{I}(x, y)$ линейной оптической системы:

$$\hat{I}(\nu_x, \nu_y) = \hat{P}(\nu_x, \nu_y) \hat{I}_0(\nu_x, \nu_y). \quad (5)$$

Соотношение (5) в общем виде определяет пространственно-частотную трансформацию космического изображения наземного (надводного) 2-D объекта, искажаемого комплексной спутниковой оптической системой «турбулентная атмосфера - молекулярно-аэрозольная атмосфера – бортовой оптический регистратор». В общем случае передаточная функция $\hat{P}(\nu_x, \nu_y)$ является комплексно-значной и может быть представлена в следующем виде:

$$\hat{P}(\nu_x, \nu_y) = |\hat{P}(\nu_x, \nu_y)| e^{-i\Phi(\nu_x, \nu_y)}. \quad (6)$$

Функция $|\hat{P}(\nu_x, \nu_y)|$, равная модулю оптической передаточной функции $\hat{P}(\nu_x, \nu_y)$, является оптической передаточной функцией или частотно-контрастной характеристикой указанной линейной системы, фильтрующей пространственные частоты исходного изображения объекта при съемке Земли из космоса. Фазочастотной характеристикой

такой системы $\Phi(v_x, v_y)$ можно пренебрегать в случае симметричной функции рассеяния $\hat{S}(v_x, v_y)$ или при космической съемке объекта в надир $\{\Phi(v_x, v_y) = 0\}$, что упрощает рассмотрение проблемы атмосферной фильтрации спутниковой видеоинформации.

Далее, если комплексная линейная оптическая система состоит из N независимых динамических компонент, каждая из которых характеризуется своей оптической передаточной функцией $|\Pi_i(v_x, v_y)|$, $i=1, 2, \dots, N$, то результирующая передаточная функция системы будет равна их произведению:

$$|\Pi_{\Sigma}(v_x, v_y)| = \prod_{i=1}^N |\Pi_i(v_x, v_y)|, \quad i=1, 2, \dots, N. \quad (7)$$

Отметим, что в этом случае разрешающую пространственно-частотную способность Δ всей линейной оптической системы оценивают, как правило, либо частотной шириной функции рассеяния $\Delta[S(v_x, v_y)]$, либо аналогичной величиной $\Delta[|\Pi(v_x, v_y)|]$ оптической передаточной функции $|\Pi(v_x, v_y)|$. При этом между собой они связаны известным соотношением:

$$\Delta[|\Pi(v_x, v_y)|] \approx \frac{1}{\Delta[S(v_x, v_y)]}, \quad (8)$$

где

$$\Delta^2 [|\Pi(v_x, v_y)|] \approx \iint_{-\infty}^{+\infty} |\Pi(v_x, v_y)| dv_x dv_y. \quad (9)$$

3. «Теоретические модели линейной динамической системы «рассеивающая турбулентная атмосфера – бортовой оптический прибор». При рассмотрении репрезентативных теоретических моделей развитой атмосферной турбулентности будем принимать во внимание гипотезу «замороженной турбулентности» (гипотеза Тейлора) (см., например, [23]). Согласно этой гипотезе временные флуктуации метеорологических параметров атмосферы в точке (x, y, z) обусловлены не изменениями самих параметров, а переносом пространственной картины флуктуаций показателя преломления и его средним потоком. Это базовое предположение позволяет не рассматривать временные флуктуации показателя преломления n отдельно от его пространственных изменений, поскольку они оказываются связанными между собой. В этом случае временные спектры динамических полей метеорологиче-

ских параметров могут быть выражены через пространственные величины, и наоборот. Таким образом, в этом приближении распространение электромагнитных волн в случайно-неоднородной среде в условиях ее турбулентности факторизуется благодаря флуктуациям показателя преломления среды n . При этом их статистика определяется статистикой самой турбулентности. Вне полос поглощения величина n является вещественной и описывается следующей формулой [24]:

$$n = 1 + 77,6(1 + 7,52 \cdot 10^{-3} \lambda^{-2}) \frac{P}{T} 10^{-6}, \quad (10)$$

где длина волны λ задается в мкм, давление атмосферы P в микробаррах и температура T в градусах Кельвина. Отметим, что в условиях земной атмосферы флуктуации показателя преломления δn обусловлены, главным образом, флуктуациями температуры и скорости ветра V в земной атмосфере. Полагая статистику флуктуаций δn пространственно стационарной и изотропной, имеем в инерционном интервале турбулентности (l_0, L_0) для структурной функции $\mathcal{D}_n(r)$ флуктуаций показателя преломления n , определяющей влияние турбулентности на разрешающую способность спутникового оптического прибора, следующее основное соотношение (закон Колмогорова 2/3) [25]:

$$\mathcal{D}_n(r) = C_n^2(h)r^{2/3}, \quad (11)$$

где $r = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$ - расстояние между точками измерения турбулентного потока, $C_n^2(h)$ - структурный параметр турбулентности, зависящий от атмосферных метеорологических условий и высоты наблюдения h над поверхностью Земли. Инерционный интервал развитой турбулентности (l_0, L_0) в земной атмосфере соответствует диапазонам ($10\text{м} \leq L_0 \leq 100\text{м}$) и ($10^{-3}\text{м} \leq l_0 \leq 10^{-2}\text{м}$), удовлетворяя условию $l_0 \ll D \ll L_0$, где D - диаметр приемной линзы бортового оптического прибора. Отметим, что согласно теоретическим оценкам вблизи земной поверхности ($h \sim 2,5\text{м}$) величина параметра $C_n^2(h_0)$ меняется от ($10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$) для сильной турбулентности и до ($10^{-17} \text{ м}^{-2/3}$) для слабой турбулентности. Типичным средним значением считается $C_n^2(h_0) = 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$. Зависимость структурного параметра турбулентности $C_n^2(h)$ от высоты h по данным [26] представлена на рисунке 2.

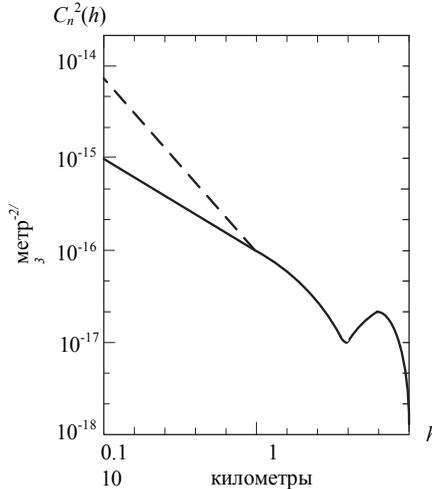


Рис. 2. Структурный параметр турбулентности $C_n^2(h)$ в зависимости от высоты наблюдения над поверхностью Земли

В дальнейшем для учета влияния атмосферной турбулентности на качество изображений, формируемых бортовым оптическим прибором, и в частности, на его разрешающую Δ способность, необходимо выбрать метод решения исходных уравнений распространения электромагнитного излучения в случайно-неоднородной среде. В настоящее время для решения указанной задачи используется метод малых возмущений в его первых приближениях, при которых пренебрегают влиянием многократного рассеяния излучения в среде (приближение Борна) [27]. В методе Борна учитывается возмущение электромагнитного поля за счет рассеянного излучения, обусловленного большим числом независимых рассеивателей в среде. Поэтому в задачах многократного рассеяния электромагнитного излучения в случайно-неоднородных средах при наблюдении наземных (надводных) объектов сквозь турбулентную атмосферу (вне прямой видимости и на длинных трассах) использование метода Борна предпочтительнее по сравнению с другими методами, например, с методом плавных возмущений Рытова [28]. В методе Рытова, который так же, как и метод Борна, широко применяется в теории распространения электромагнитных волн в турбулентной атмосфере, используется не само электромагнитное поле в виде суммы случайных вкладов от независимых рассеивателей, а его логарифмически преобразованные амплитудные флуктуации. Отметим, что согласно экспериментальным данным в задачах многократного рассеяния электромагнитных волн в турбу-

лентной атмосфере, в пределах прямой видимости (однократное рассеяние) приближение Рытова более точно отражает существующие реальности [29].

С учетом вышеизложенного рассмотрим теперь имитационные теоретические модели, позволяющие оценить влияние атмосферной турбулентности на качество изображения, формируемое линейной оптической системой, состоящей из собственно турбулентной атмосферы и бортовой регистрирующей аппаратуры. Согласно [30] оптическая передаточная функция $|P|$ тонкой сферической линзы в составе бортовой регистрирующей аппаратуры определяется по формуле:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left| P\left(\frac{\rho}{D}\right) \right|_{\text{прибор}} = \frac{2}{\pi} \left\{ \arccos\left(\frac{\rho}{D}\right) - \left(\frac{\rho}{D}\right) \left[1 - \left(\frac{\rho}{D}\right)^2 \right]^{1/2} \right\}, \left(\frac{\rho}{D}\right) \leq 1, \\ \left| P\left(\frac{\rho}{D}\right) \right|_{\text{прибор}} = 0, \left(\frac{\rho}{D}\right) > 1, \end{array} \right. \quad (12)$$

где параметр $r = \lambda \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} f$, f - фокусное расстояние линзы, D - диаметр линзы изображающей оптики.

Если считать время экспозиции космической съемки бесконечно большим ($t_{\text{экс}} \gg 1$ сек.), то в этом случае основной теоретический результат состоит в заключении [31], что оптическая передаточная функция $|\Pi_{\Sigma}(v_x, v_y)|$ системы «турбулентная атмосфера-бортовой оптический прибор», нормированная на единицу в начале координат ($v_x = 0, v_y = 0$), равна произведению оптических передаточных функций турбулентной атмосферы $|\Pi(v_x, v_y)|_{\text{турб.}}$ и оптического прибора $|\Pi(v_x, v_y)|_{\text{приб.}}$, именно:

$$|\Pi_{\Sigma}(v_x, v_y)| = |\Pi(v_x, v_y)|_{\text{турб.} + \text{приб.}} = |\Pi(v_x, v_y)|_{\text{турб.}} \times |\Pi(v_x, v_y)|_{\text{приб.}}. \quad (13)$$

Оптическая передаточная функция собственно турбулентной атмосферы $|\Pi(v_x, v_y)|_{\text{турб.}}$ в приближении Рытова равна:

$$|\Pi(v_x, v_y)|_{\text{турб.}} = \exp \left[-1,46 \frac{k^2}{\cos \theta} \rho^{5/3} \int^{H_{\text{орб}}} C_n^2(h) \left(1 - \frac{h}{H_{\text{орб}}} \right)^{5/3} dh \right], \quad (14)$$

где волновое число $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, θ - угол наклона трассы распространения

излучения, $\rho = \frac{\lambda H_{\text{орб}}}{M \cos \theta}$, M - период наземной гармонической само-

светящейся мирры, $H_{\text{обр}}$ – высота расположения бортового оптического прибора.

В случае больших, но конечных времен экспозиции съемки ($t_{\text{зкс}} < \infty$) не удается разделить искажение изображения за счет турбулентной атмосферой [32] и оптического прибора [33]. Однако, как будет показано ниже на основе проведенного численного моделирования, величины результирующих передаточных функций в обоих случаях практически совпадают в широком диапазоне метеорологических условий земной атмосферы.

Соотношение (14) показывает, что для расчета оптической передаточной функции турбулентной атмосферы $\left| \Pi(v_x, v_y) \right|_{\text{мюрб.}}$ необходима информация о высотной зависимости структурной характеристики флюктуации показателя преломления $C_n^2(h)$. Учитывая существенную экспериментальную зависимость этой базовой величины от характера и интенсивности атмосферной турбулентности, в [34] предложено использовать для нее полуэмпирические аппроксимирующие функции для «очень хорошей» и «очень плохой» атмосферной видимости, а также для промежуточных условий в виде среднего геометрического для них. Именно для «очень хороших» условий видимости имеем:

$$C_n^2(h) = 5.19 \cdot 10^{-16} \cdot 10^{-0.86h} + 10^s, \quad (15)$$

где $s = -18.34 + 0.29h - 2.84 \cdot 10^{-2} h^2 + 7.43 \cdot 10^{-4} h^3$

Для «очень плохих» условий видимости в [31] предложено следующее представление величины $C_n^2(h)$:

$$C_n^2(h) = 9.52 \cdot 10^{-14} \cdot 10^{-2.09h} + 10^s, \quad (16)$$

где $s = -14.39 + 0.17h - 3.48 \cdot 10^{-2} h^2 + 9.59 \cdot 10^{-4} h^3$.

Соответственно для промежуточных условий атмосферной видимости имеем:

$$C_n^2(h) = \sqrt{C_{n,\text{хор.}}^2 \times C_{n,\text{плх.}}^2}. \quad (17)$$

В таблице 1 представлены значения оптической передаточной функции рассеивающей турбулентной атмосферы $\left| \Pi(v_x, v_y) \right|_{\text{мюрб.}}$ для трех указанных выше приближенных моделей высотного хода $C_n^2(h)$ в случае бесконечного ($t_{\text{зкс.}} = \infty$) и конечного ($t_{\text{зкс.}} < \infty$) времен экспозиции.

Таблица 1. Значения оптической передаточной функции турбулентной атмосферы $|\Pi(\nu_x, \nu_y)|_{\text{турб.}}$ в зависимости от метеорологических условий видимости и времени экспозиции космической съемки

хорошие условия видимости				
F \ t _{экс.}	0,1047·10 ⁴	0,1047·10 ⁵	0,1047·10 ⁶	0,1047·10 ⁷
t _{экс.} =∞	1,0000	0,9996	0,9811	0,4566
t _{экс.} <∞	1,0000	0,9996	0,9811	0,4566
средние условия видимости				
t _{экс.} =∞	0,9990	0,9949	0,7926	0,7194·10 ⁻⁴
t _{экс.} <∞	0,9990	0,9949	0,7926	0,7194·10 ⁻⁴
плохие условия видимости				
t _{экс.} =∞	0,9982	0,9100	0,1969·10 ⁻¹	0,9978·10 ⁻⁷
t _{экс.} <∞	0,9982	0,9100	0,1969·10 ⁻¹	0,5228·10 ⁻⁸

Данные таблице 1 показывают, что оптические передаточные функции рассеивающей турбулентной атмосферы $|\Pi(\nu_x, \nu_y)|_{\text{турб.}}$ практически совпадают для бесконечного (t_{экс.}=∞) и конечного времени (t_{экс.}<∞) экспозиции космической съемки.

4. Влияние атмосферной турбулентности и параметров бортового оптического прибора на разрешающую способность спутникового канала изображения. Рассмотрим теперь влияние атмосферной турбулентности и параметров бортового оптического прибора на разрешающую способность рассматриваемой линейной оптической системы. Параметр, который характеризует влияние рассеивающей турбулентной атмосферы на разрешающую способность системы, включающей бортовой оптический прибор, можно определить радиусом атмосферной когерентности r_0 (см., например, [17]):

$$r_0(\Delta) = 0,185\lambda^{6/5} \left[\int_0^{\mathcal{L}} C_n^2 dh \right]^{-3/5}, \quad (18)$$

где \mathcal{L} - длина трассы наблюдения.

При коротких временах экспозиции (t_{экс.}<<0,01сек) и, следовательно, для коротких трасс визирования, когда можно пренебрегать зависимостью величины $C_n^2(h)$ от высоты h и не учитывать эффекты многократного молекулярно-аэрозольного рассеяния, из (18) получаем соотношение:

$$r_0(\Delta) = 0,185\lambda^{6/5} \mathcal{L}^{-3/5} (C_n^2)^{-3/5}. \quad (19)$$

При больших временах экспозиции ($t_{\text{экс.}} \gg 0,01 \text{ сек}$) и соответственно в случае длинных трасс наблюдения расчетным для передаточной функции бортового оптического прибора и турбулентной атмосферой является выражение:

$$|\Pi(\Omega)|_{\text{турб+прибор}} = |\Pi(\Omega)|_{\text{прибор}} \exp \left\{ -3,44 \left(\frac{\lambda \Omega}{r_0} \right) \right\}, \quad (20)$$

где $\Omega = \nu f$.

В общем случае мерой разрешающей способности Δ , рассматриваемой линейной оптической системы со сферически-симметричной оптической передаточной функцией $|\Pi(\Omega)|_{\text{турб+прибор}}$, нормированной на единицу в начале координат ($\nu_x = \nu_y = 0$), может служить объем $\mathcal{R}(\Delta)$ под ее поверхностью:

$$\mathcal{R}(\Delta) = 2\pi \int_0^\infty \Omega |\Pi(\Omega)|_{\text{турб+прибор}} d\Omega. \quad (21)$$

Величину $\mathcal{R}(\Delta)$ можно оценить численно (см., например, [17]). Соответствующая зависимость приведена на рисунке 3. При $\left(\frac{d_0}{r_0}\right) = 1$ пространственно-частотное разрешение оптической системы растет с увеличением размера апертуры d_0 как квадрат отношения $\left(\frac{d_0}{r_0}\right)$. При $\left(\frac{d_0}{r_0}\right) \approx 1$ рост разрешающей способности замедляется настолько, что дальнейшее увеличение параметра d_0 практически не влияет на величину $\mathcal{R}(\Delta)$. При $\left(\frac{d_0}{r_0}\right) \ll 1$ величина $\mathcal{R}(\Delta)$ стремится к постоянному максимальному значению $\mathcal{R}_{\text{max}}(\Delta)$.

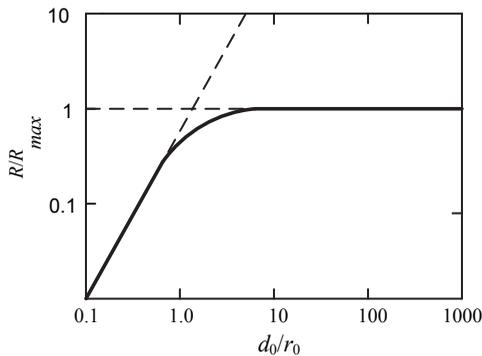


Рис.3. Нормализованная разрешающая способность $\left(\mathcal{R}/\mathcal{R}_{\text{max}}\right)$ оптической системы в зависимости от приведенного диаметра изображающей оптики $\left(\frac{d_0}{r_0}\right)$ при длинных экспозициях ($t_{\text{экс}} \gg 0,01 \text{ сек.}$)

Пересечение двух асимптот на рисунке 3 происходит при выполнении равенства $d_0=r_0$, чем и объясняется введение параметра r_0 согласно формуле (19). Значения r_0 для условий наблюдения наземного (надводного) объекта через незамутненную турбулентную атмосферу в надир ($\theta=0$) располагаются в пределах $r_0\sim 5-20$ см в зависимости от степени ее загрязнения и метеорологических условий. Для наклонных трасс и при углах наблюдения θ , отличных от 0, величина параметра r_0 может быть много меньше. Отметим, что максимальную меру разрешающей способности $\mathcal{R}_{max}(\Delta)$ можно асимптотически оценить, заменяя при $\left(\frac{d_0}{r_0}\right) \rightarrow \infty$ входящей в (21) интеграл его известным табличным аналогом (см. [17]):

$$\frac{\pi}{2} \int_0^{\infty} x \exp[-(ax)^{5/3}] dx, \quad (22)$$

где параметр $a = (3,44)^{3/5} \left(\frac{d_0}{r_0}\right)$.

В результате такой замены вместо (21) получаем для $\mathcal{R}_{max}(\Delta)$ приближенное асимптотическое соотношение:

$$\mathcal{R}_{max}(\Delta) \approx \left(\frac{r_0}{\lambda}\right)^2. \quad (23)$$

Выражение (23) для $\mathcal{R}_{max}(\Delta)$ соответствует плоскому углу разрешения $\left(\frac{\lambda}{r_0}\right)$ оптического прибора или адекватно пространственному линейному размеру $\left(\frac{\lambda}{r_0}\right) \mathcal{L}$.

Отметим теперь принципиальные отличия в работе бортовой оптической системы, формирующей изображение в условиях турбулентной атмосферы, при переходе от длинных ($t_{\text{экс}} \gg 10^{-2}$ сек.) к коротким экспозициям съемки ($t_{\text{экс}} \ll 10^{-2}$ сек.). В последнем случае появляется возможность пренебречь влиянием на качество изображения тех искажений волнового фронта, которые сводится к изменению среднего угла наклона трассы наблюдения. При этом наклон волнового фронта падающей волны при коротких экспозициях приводит лишь к смещению центра изображения, но не меняет его пространственной структуры. Что касается длинных экспозиций, то флюктуация угла наклона трассы наблюдения приводит к расширению усредненной функции рассеяния $|S(\nu_x, \nu_y)|$ и, следовательно, к сужению частотной ширины оптической передаточной функции рассматриваемой системы $|\Pi(\nu_x, \nu_y)|$, (см. рисунок 4).

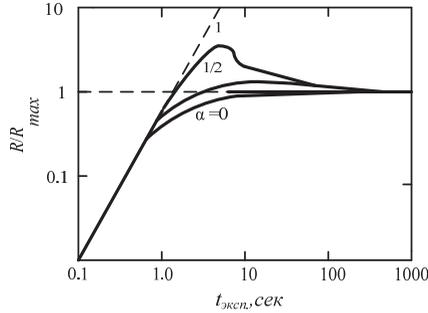


Рис. 4. Разрешающая способность оптической системы при длинных и коротких экспозициях

На рисунке 4 представлены численные значения нормализованной разрешающей способности (R / R_{max}) оптической системы в зависимости от времени экспозиции $t_{эксп}$. съемки: $\lambda=500\text{мм}$, диаметр атмосферной когерентности $r_0=10\text{см}$, $\alpha=0$ – длинные экспозиции съемки, $\alpha=1$ – короткие экспозиции съемки, $\alpha=1/2$ – промежуточный случай.

5. Влияние многократного молекулярно-аэрозольного рассеяния на пространственно-частотную фильтрацию космических изображений природных образований. Рассмотрим теперь в рамках теории линейных оптических систем и преобразований влияние многократного молекулярно-аэрозольного рассеяния на пространственно-частотную фильтрацию спутниковых изображений природных образований. На рисунке 5 представлена приближенная аналитическая модель пространственно-частотного фильтра земной атмосферы при учете многократного рассеяния фотонов в молекулярно-аэрозольной земной атмосфере [35].

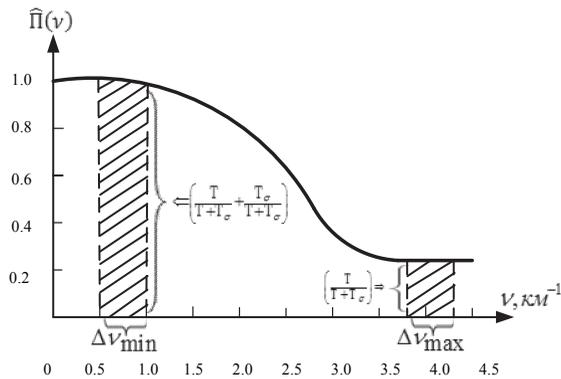


Рис. 5. Приближенная аналитическая модель пространственно-частотного фильтра аэрозольно-молекулярной земной атмосферы в видимой области спектра $\lambda=(400-800)\text{нм}$

Из данной модели следует, что при многоспектральной съемке Земли из космоса молекулярно-аэрозольной рассеивающая и поглощающая компонента атмосферы является полосовым пространственно-частотным фильтром, пропускающим в основном низкочастотные и подавляющим высокочастотные (мелкомасштабные) фрагменты спутниковых изображений и спектров яркости наземных (надводных) природных образований. В рамках использованной концепции комплексных линейных оптических систем расчетные данные для оптической передаточной функции $|\Pi(v_x, v_y)|_{\text{аэр}}$ молекулярно-аэрозольной атмосферы, представленные на рисунке 5, получены на основе линейности и инвариантности решений соответствующих краевых задач теории переноса излучения [2]. При этом для получения приближенных аналитических выражений передаточной функции $|\Pi(v_x, v_y)|_{\text{аэр}}$ использовалась полиномиальная (квадратичная) аппроксимация атмосферного частотного фильтра и точные численно-аналитические решения соответствующих краевых задач D-1 теории переноса излучения.

Согласно [35] в отсутствие фазочастотной зависимости $[\Phi(v) = 0]$ модуль передаточной функции $\hat{\Pi}_{\text{аэр}}(v)$ рассеивающей и поглощающей молекулярно-аэрозольной земной атмосферы, нормированной при $v = 0$, определяется согласно выражению:

$$\hat{\Pi}(v) = \frac{|\Pi_{\text{аэр}}(v)|}{|\Pi_{\text{аэр}}(0)|} = \delta_*(v) + [1 - \delta_*(v)] \frac{T(\theta, r_0)}{T_\sigma(\theta, r_0) + T(\theta, r_0)}, \quad (24)$$

где модельный полуэмпирический аппроксимирующий параметр $\delta_*(v)$ рассчитывается следующим образом:

$$\delta_*(v) = -\frac{(v - v_{*,\min})}{(v_{*,\max} - v_{*,\min})}. \quad (25)$$

Параметр τ_0 - полная оптическая толщина молекулярно-аэрозольной земной атмосферы в вертикальном направлении $\theta=0^\circ$. Экстремальные пороговые частоты в (25), за пределами которых атмосферный полосовой фильтр превращается в полосовой модулятор, равны $v_{*,\min} = (0,5 - 1)\text{км}^{-1}$ и $v_{*,\max} = 3,5\text{км}^{-1}$. Функция $T(\theta, \tau_0) = \exp\{-\tau_0 \cos\theta\}$ является прямой прозрачностью земной атмосферы, обусловленной однократным рассеянием излучения, а $T_\sigma(\theta, \tau_0)$ равна диффузной прозрачности атмосферы, определяемой многократным рассеянием излучения в направлении текущего угла визирования θ .

Таким образом, пространственно-частотный фильтр многократно рассеивающей и поглощающей молекулярно-аэрозольной земной

атмосферы определяется согласно (24) двумя пороговыми пространственными частотами $\nu_{*,min} = (0,5 - 1)\text{км}^{-1}$ и $\nu_{*,max} = 3,5\text{км}^{-1}$, а также соотношением между ее прямой (Т) и диффузной (Т_о) прозрачностью. При этом за пределами указанных пороговых частот $\nu \leq \nu_{*,min}$ и $\nu \geq \nu_{*,max}$ атмосферный пространственно-частотный фильтр ведет себя как полосовой модулятор, равномерно искажающий по всем частотам ν фрагменты спутниковых изображений и спектров яркости спектрофотометрируемых объектов (см. таблицу 2).

Таблица 2. Зависимость оптической передаточной функции молекулярно-аэрозольной атмосферы от пространственной частоты ν (замкнутая аэрозольная модель Элтермана [36], съемка в надир $\theta=0^\circ$, $\nu_{*,min} = (0,5 - 1)\text{км}^{-1}$ и $\nu_{*,max} = 3,5\text{км}^{-1}$

$\nu, \text{км}^{-1}$	$ H(\nu) _{aэp.}$		$\nu, \text{км}^{-1}$	$ H(\nu) _{aэp.}$	
	$a_0=0,2;$ $a_1=0,2$	$a_0=0,6;$ $a_1=0,3$		$a_0=0,2;$ $a_1=0,2$	$a_0=0,6;$ $a_1=0,3$
10^{-1}	2,110	2,739	5	1,070	2,050
1	1,615	2,410	10	1,070	2,050
3	1,080	2,053	10^2	1,070	2,050
4	1,075	2,050	10^4	1,070	2,050

В таблице 2 представлены значения нормированной оптической передаточной функции $|H(\nu)|_{aэp.}$ рассеивающей и поглощающей молекулярно-аэрозольной земной атмосферы (модель Элтермана) [36] в зависимости от пространственной частоты ν наземной миры (26), наблюдаемой из космоса.

6. Численные модели пространственно-частотной фильтрации комплексным оптическим каналом дистанционного зондирования Земли из космоса. Проведенный выше анализ позволяет провести численное имитационное моделирование всей комплексной оптической системы, состоящей из следующих независимых компонент:

- рассеивающая и поглощающая турбулентная земная атмосфера;
- рассеивающая и поглощающая молекулярно-аэрозольная земная атмосфера в условиях ее турбулентного состояния;
- регистрирующий бортовой прибор, формирующий много-спектральные изображения наземных (надводных) объектов при съемке Земли из космоса.

В этой связи отметим, что если известна оптическая передаточная функция $|P_\Sigma(\nu_x, \nu_y)|$ комплексной системы «атмосферная турбулентность – молекулярно-аэрозольное рассеяние – бортовой оптический прибор», то общее трансформирующее влияние этой системы на

качество спутниковой видеoinформации при съемке Земли из космоса можно также адекватно оценить с помощью ее частотно-контрастной характеристики (ЧКХ). Учитывая, что яркость любого наземного (надводного) протяженного ортотропного объекта, наблюдаемого из космоса, представима в виде отрезка ряда Фурье, рассмотрим наземную плоскую мирру, альбеда $A(x, y)$ которой меняется вдоль одной из декартовых координат (x, y) по гармоническому закону, а вдоль другой постоянно, именно:

$$A(x, y) = a_0 + a_1 \cos\left(\frac{2\pi}{M}, x\right), \quad (26)$$

где $M \in [0, \infty)$ - период мирры.

Освещенность такой мирры в плоскости изображения бортового оптического прибора $I(x, y)$ связана с исходной яркостью объекта, определяемой величиной альбеда $A(x', y')$, следующим соотношением:

$$I(x, y) = \iint S(x - x', y - y') A(x', y') dx' dy', \quad (27)$$

где

$$A(x', y') = a_0 + a_1 \cos\left(\frac{2\pi}{m}, x'\right), \quad m = qM. \quad (28)$$

Параметр q равен коэффициенту линейного увеличения линзы бортового оптического прибора:

$$q = \frac{f}{f + H_{\text{орб}} / \cos\theta}, \quad \text{при } H_{\text{орб}} \gg f, \quad (29)$$

где f - фокусное расстояние приемной линзы, $H_{\text{орб}}$ - высота орбиты космической станции, θ - текущий угол визирования наземного (надводного) объекта.

Проведя пространственное статическое усреднение величины $I(x, y)$, получаем:

$$\begin{aligned} \langle I(x, y) \rangle &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} A(x', y') S(x - x', y - y') dx' dy' = \\ &= a_0 + a_1 \cos\left(\frac{2\pi}{m}, x\right) \hat{S}\left(\frac{2\pi}{m}, \theta\right). \end{aligned} \quad (30)$$

Учитывая соотношение (4), имеем:

$$\hat{\Pi}\left(\frac{2\pi}{m}, 0\right) = \hat{S}\left(\frac{2\pi}{m}, 0\right). \quad (31)$$

С другой стороны, размытие изображения наземной мирры (26) в плоскости изображения бортового оптического прибора можно харак-

теризовать контрастом этого изображения на уровне орбиты космического носителя:

$$K_{\infty} = \frac{\langle I \rangle_{\max} - \langle I \rangle_{\min}}{\langle I \rangle_{\max} + \langle I \rangle_{\min}}, \quad (32)$$

где $\langle I \rangle_{\max}$ и $\langle I \rangle_{\min}$ соответственно максимальные и минимальные значения средней яркости наземного (надводного) объекта в плоскости изображения бортового оптического прибора.

В рассматриваемом случае видимый контраст K_{∞} изображения мирры (26) с учетом соотношения (30) определяется следующим выражением:

$$K_{\infty} \left(\frac{2\pi}{m}, 0 \right) = \frac{a_1}{a_2} \hat{S} \left(\frac{2\pi}{m}, 0 \right) = \frac{a_1}{a_2} \hat{\Pi} \left(\frac{2\pi}{m}, 0 \right). \quad (33)$$

Таким образом, контраст космического изображения K_{∞} наземной гармонической мирры (26), с точностью до постоянного множителя $\left(\frac{a_0}{a_1} \right)$ совпадает с нормированной оптической передаточной функцией оптической системы $\hat{\Pi} \left(\frac{2\pi}{m}, 0 \right)$. Принимая во внимание, что величина $\left(\frac{a_0}{a_1} \right)$ равна контрасту K_0 наземной мирры (26) на уровне подстилающей поверхности, для частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) линейной оптической системы соответствующее равенство эквивалентности имеет следующий вид:

$$P(v_x, v_y) = \left| \frac{K_{\infty}}{K_0} \right| = \left| \frac{\Pi_{\Sigma}(v_x, v_y)}{\Pi_{\Sigma}(0,0)} \right|. \quad (34)$$

Учитывая формулу (34), для расчета ЧКХ рассматриваемой комплексной линейной оптической системы при отсутствии фазочастотной зависимости [$\Phi(v_x, v_y) = 0$] необходимо использовать представленные выше нормированные выражения для $\left| \Pi(v_x, v_y) \right|$ в случае турбулентной атмосферы $\hat{\Pi}_{\text{турб}}(v_x, v_y) = \left| \frac{\Pi_{\text{турб}}(v_x, v_y)}{\Pi_{\text{турб}}(0,0)} \right|$, для бортового оптического прибора $\hat{\Pi}_{\text{приб}}(v_x, v_y) = \left| \frac{\Pi_{\text{приб}}(v_x, v_y)}{\Pi_{\text{приб}}(0,0)} \right|$ и молекулярно-аэрозольной атмосферы $\hat{\Pi}_{\text{атм}}(v_x, v_y) = \left| \frac{\Pi_{\text{атм}}(v_x, v_y)}{\Pi_{\text{атм}}(0,0)} \right|$:

$$\hat{\Pi}_{\Sigma}(v_x, v_y) = \hat{\Pi}_{\text{турб}}(v_x, v_y) \times \hat{\Pi}_{\text{приб}}(v_x, v_y) \times \hat{\Pi}_{\text{атм}}(v_x, v_y). \quad (35)$$

7. Результаты численного моделирования оптического пространственно-частотного атмосферного фильтра при съемке Земли из космоса. Численное моделирование комплексного пространственно-частотного атмосферного фильтра (35) было проведено для соответствующих оптико-физических параметров каждой из его компонент и использовании соотношений (15)-(17) применительно к условиям космической съемки Земли в видимой области спектра $\lambda = (400-800)\text{нм}$. Для численного моделирования передаточной функции турбулентной атмосферы $\hat{\Pi}_{\text{турб}}(v_x, v_y)$ прежде всего необходима информация о высотном профиле ее структурной функции $C_n^2(h)$. Как отмечено выше, обработка экспериментальных данных высотной зависимости структурной характеристики флуктуаций показателя преломлений $C_n^2(h)$, проведенная в [34], позволила построить полуэмпирические модельные структурные функции $C_n^2(h)$ в виде соотношений (15)-(17) для четырех метеорологических состояний земной атмосферы, соответствующих «хорошим», «плохим» и «средним» условиям ее видимости. Выше на указанной основе были рассчитаны численные модели нормированных оптических передаточных функций турбулентной атмосферы $\left| \frac{\Pi_{\text{турб}}(v_x, v_y)}{\Pi_{\text{турб}}(0, 0)} \right| = \hat{\Pi}_{\text{турб}}(v_x, v_y)$ для бесконечного ($t_{\text{экс.}} = \infty$) и конечного ($t_{\text{экс.}} < \infty$) времен экспозиции в зависимости от волнового числа $\sqrt{v_x^2 + v_y^2} F$, где $F = f/D$ (таблица 1).

Входными параметрами проведенного численного моделирования являются: высота орбиты космической станции $H_{\text{орб}}(m)$, период наземной (надводной) гармонической мирры $M(m)$, фокусное расстояние линзы бортового оптического прибора f (м), диаметр D линзы (м), длина волны излучения λ (нм), угол наклона трассы визирования θ (рад), время экспозиции t (сек), скорость движения космической станции V (м/сек), β - угол обзора съемки (град).

Как отмечено выше, величины $|\Pi_{\text{турб}}(v)|$ в случае бесконечного ($t_{\text{экс.}} = \infty$) и конечного ($t_{\text{экс.}} < \infty$) времен экспозиции практически совпадают и, следовательно, одинаково влияют на пространственное разрешение бортовой оптической системы $\left(\frac{\lambda H_{\text{орб}}}{M \cos \theta} \right)$. Из анализа проведенного численного имитационного моделирования следует, что разрешающая способность Δ бортовой оптической аппаратуры, опреде-

ляемая предельным периодом M наземной мирры (26), при параметрах наблюдений с космической станции ($H_{orb} \sim 100$ км, $\lambda = 0,55 \cdot 10^{-6}$ м, $v = 10^4$ км/сек, $\theta = \theta^0$, $D = 1$ м, $f = 1$ м, $T = 2 \cdot 10^{-6}$ сек, $\beta = 2^0$), составляет при очень хороших условиях видимости $\Delta \sim 1$ м и для плохой видимости $\Delta \sim 10$ м.

Далее, как следует из табл. 1, для заданных параметрах расчетов значения $\left| \frac{P_{myrb,\infty}(v)}{P_{myrb,\infty}(0)} \right|$ и $\left| \frac{P_{myrb,t}(v)}{P_{myrb,t}(0)} \right|$ практически совпадают. Это означает, что скорость космической станции V и время экспозиции $t_{эксн.}$ съемки наземной мирры (26) практически не влияют на пространственное разрешение спутникового изображения системой «турбулентная атмосфера - бортовой оптический прибор». Кроме того, проведенное численное моделирование показало, что значения оптической передаточной функции $|P(v)|_{турб.}$ в пределах погрешности (10^{-5}) практически не зависят от высоты орбиты H_{orb} космической станции при ее изменении в пределах от 50 км до 250 км.

Далее, из данных таблицы 2 следует, что для указанных выше параметров $|P(v)|_{aэр.}$ предельный период пространственного разрешения наземной (надводной) гармонической мирры (26), наблюдаемой из космоса сквозь молекулярно-аэрозольную атмосферу, составляет $\approx 200-300$ м. Таким образом, полученные количественные оценки позволяют сделать вывод, что основной вклад в атмосферное искажение космических снимков и спектров яркости природных образований большого пространственного масштаба обусловлен не флуктуациями показателя преломления атмосферы, и, следовательно, не ее турбулентностью, а наличием в ней рассеивающих аэрозольных частиц и молекул. Следовательно, при проведении процедуры атмосферной коррекции спутниковых изображений и спектров яркостей природных и техногенных объектов среднего и низкого пространственного масштаба эффектом турбулентности можно пренебречь. Подобный эффект следует учитывать только для атмосферной коррекции космических снимков очень высокого пространственного разрешения ($\Delta \ll 1$ м).

Для рассмотренных выше теоретических моделей оптических передаточных функций чисто турбулентной $|P(v, \theta)|_{турб.}$ и молекулярно-аэрозольной атмосферы $|P(v, \theta)|_{aэр.}$, включая бортовой оптический прибор $|P(v, \theta)|_{прибор}$, было проведено комплексное численное моделирование общей нормированной оптической передаточной функции

$\left| \frac{\Pi_{\Sigma}(\nu, \theta)}{\Pi_{\Sigma}(0, \theta)} \right| = \hat{\Pi}_{\Sigma}(\nu, \theta)$ в зависимости от указанных выше параметров, а

также от пространственной частоты $\nu = 1/M$ и длины волны λ .

Результаты проведенного численного имитационного моделирования показали, что в отдельности оптические нормированные передаточные функции турбулентной атмосферы $|\Pi(\nu, \theta)|_{\text{турб}}$, молекулярно-аэрозольного рассеяния $|\Pi(\nu, \theta)|_{\text{аэр}}$ и бортового оптического прибора $|\Pi(\nu, \theta)|_{\text{приб}}$ для различных метеорологических условий видимости существенно отличаются друг от друга. Особенно это заметно на больших пространственных частотах ν . Спектральная зависимость передаточных функций турбулентной атмосферы и космического прибора показывает уменьшение величины $|\Pi(\nu, \theta)|_{\text{приб}}$ и относительно слабое увеличение величины $|\Pi(\nu, \theta)|_{\text{турб}}$ при увеличении длины волны λ . Однако общая оптическая передаточная функция системы $|\Pi(\nu, \theta)|_{\text{турб}} \times |\Pi(\nu, \theta)|_{\text{аэр}}$ уменьшается с увеличением длины волны λ . Учет многократного рассеяния и поглощения излучения в молекулярно-аэрозольной атмосфере приводит к увеличению общей оптической передаточной функции $|\Pi_{\Sigma}|$ при $\Delta > 10\text{ м}$ и при увеличении длины волны λ . Далее при выбранных параметрах численного моделирования большее влияние на качество спутникового изображения наземной гармонической мишени (26) оказывают искажения, обусловленные бортовым оптическим прибором, а не турбулентной атмосферой. Аналогичный вывод справедлив и для оптических передаточных функций многократно рассеивающей молекулярно-аэрозольной атмосферы $|\Pi(\nu, \theta)|_{\text{аэр}}$ по сравнению с турбулентной атмосферой $|\Pi(\nu, \theta)|_{\text{турб}}$. Именно величины $|\Pi(\nu, \theta)|_{\text{аэр}} \times |\Pi(\nu, \theta)|_{\text{турб}}$ в видимой ($\lambda=400\text{-}800\text{ нм}$) и ближней ИК ($\lambda=800\text{-}1500\text{ нм}$) областях спектра показывают, что чисто рассеивающая и поглощающая молекулярно-аэрозольная атмосфера в отличие от турбулентной атмосферы подавляет все высокие частоты, пропуская только низкочастотные детали спутниковых изображений и спектров яркостей природных наземных (надводных) образований.

В качестве примеров проведенного численного моделирования на рисунке 6 представлены зависимости оптических передаточных функций молекулярно-аэрозольной атмосферы в условиях ее турбу-

лентного состояния от пространственной частоты ν наземной гармонической мурры (26), наблюдаемой из космоса: $\lambda=500$ нм, $F = 0,3M$, $\beta = 2^0$, $\theta = 0^0$.

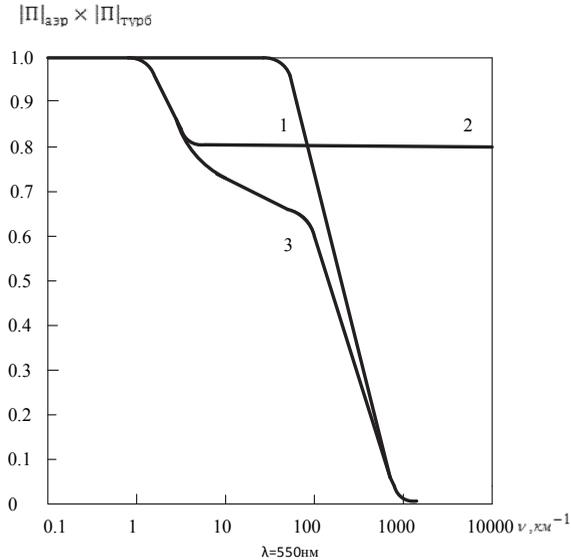


Рис.6. Частотная зависимость нормированных передаточных функций молекулярно-аэрозольной атмосферы в условиях турбулентности при «плохих» условиях видимости

Кривая 1 представляет частотную зависимость оптической передаточной функции $|\Pi(\nu, \theta)|_{турб}$ чисто турбулентной атмосферы в случае «плохих условий видимости». Кривая 2 демонстрирует частотную зависимость оптической передаточной функции многократно рассеивающей молекулярно-аэрозольной атмосферы $|\Pi(\nu, \theta)|_{аэр}$, рассчитанную по формуле (24) для замкнутой модели Элтермана [2] в случае аппроксимирующей трехчленной индикатрисы рассеяния. Кривая 3 показывает зависимость оптической передаточной функции системы «атмосферная турбулентность – молекулярно-аэрозольное рассеяние» от частоты ν для «плохих» условий видимости и многократного рассеяния в случае аппроксимирующей трехчленной атмосферной индикатрисы рассеяния [2].

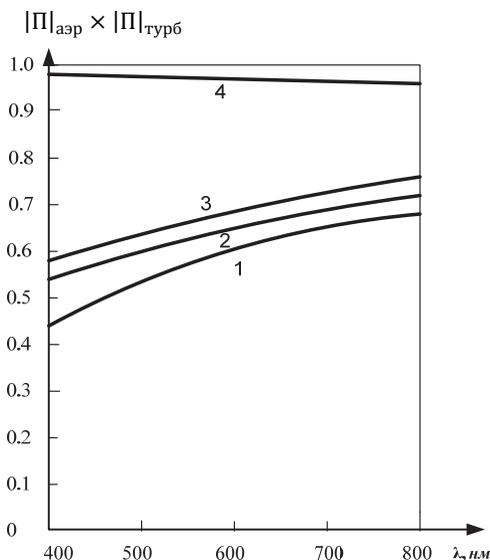


Рис. 7. Спектральная зависимость нормированных передаточных функций турбулентной атмосферы при наличии молекулярно-аэрозольной компоненты

На рисунке 7 представлены зависимости оптических передаточных функций системы «турбулентная атмосфера – молекулярно-аэрозольная атмосфера» от длины волны λ в видимой области спектра (400-800) нм: высота орбиты космического носителя $H_{orb.} = 100 \text{ км}$, фокусное расстояние бортового оптического прибора $F = 0,3 \text{ м}$, $M = 100 \text{ м}$, угол обзора космической съемки $\beta = 2^\circ$, угол наблюдения $\theta = 0^\circ$. Кривая 1 представляет спектральную зависимость оптической передаточной функции турбулентной атмосферы при учете однократного рассеяния излучения в молекулярно-аэрозольной атмосфере. Кривая 2 показывает спектральную зависимость оптической передаточной функции турбулентной атмосферы при учете многократного молекулярно-аэрозольного рассеяния в случае трехчленной аппроксимирующей индикатрисы рассеяния [2]. Кривая 3 демонстрирует спектральную зависимость оптической передаточной функции $|\Pi(\nu, \theta)|_{аэ}$ молекулярно-аэрозольной атмосферы в случае трехчленной аппроксимирующей индикатрисы рассеяния без учета атмосферной турбулентности. Кривая 4 представляет зависимость от длины волны λ оптической передаточной функции $|\Pi(\nu, \theta)|_{турб}$ чисто турбулентной атмосферы без учета многократного аэрозольно-молекулярного рассеяния в ней.

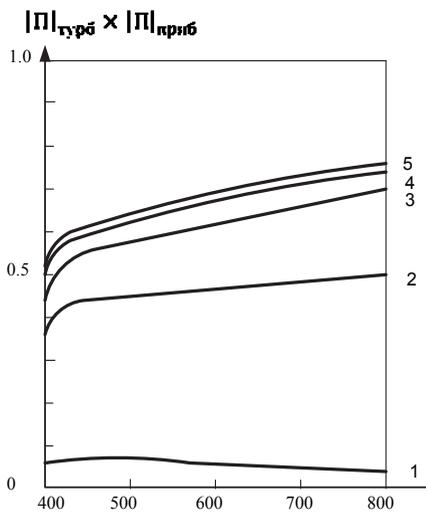


Рис. 8 Спектральная зависимость оптической передаточной функции системы «турбулентная атмосфера - бортовой оптический прибор»: высота орбиты космического носителя

На рисунке 8 представлены спектральные зависимости передаточных функций системы «турбулентная атмосфера - бортовой оптический прибор» для разных пространственных частот ν : высота орбиты космического носителя $H_{\text{орб}}=100\text{км}$, фокусное расстояние прибора $F=0,3\text{м}$, угол обзора съемки $\beta = 2^\circ$, угол наблюдения $\theta = 0^\circ$, $1 - \nu = 100\text{км}^{-1}$, $2 - \nu = 25\text{км}^{-1}$, $3 - \nu = 10\text{км}^{-1}$, $4 - \nu = 4\text{км}^{-1}$, $5 - \nu = 1\text{км}^{-1}$.

8. Заключение. Главный вывод проведенного выше анализа состоит в следующем. В видимой области спектра ($\lambda=400\text{-}800\text{ нм}$) для рассмотренных условий космической съемки наземных (надводных) природных образований в надир ($\theta=0^\circ$) эффектом турбулентности, обусловленной флуктуациями показателя преломления земной атмосферы, можно пренебречь по сравнению с искажениями, вносимыми некогерентным многократным аэрозольным и молекулярным рассеянием, а также влиянием регистрирующей бортовой спутниковой аппаратуры.

Таким образом, при проведении атмосферной коррекции космических снимков и спектров яркости наземных (надводных) природных объектов невысокого и среднего пространственного разрешения достаточно учитывать только искажения, обусловленные некогерентным многократным рассеянием и поглощением излучения в молекулярно-аэрозольной земной атмосфере и трансформирующим влиянием регистрирующей бортовой оптической аппаратуры. Что касается искажений, вносимых

чисто турбулентной земной атмосферой, то их влияние на качество указанной спутниковой видеoinформации следует учитывать только при коррекции фрагментов многоспектральных мелкомасштабных космических изображений очень высокого пространственного разрешения.

Литература

1. *Кондратьев К.Я., Смоктий О.И., Козодеров В.В.* Влияние атмосферы на исследование природных ресурсов из космоса // М: Машиностроение. 1985. 272 с.
2. *Смоктий О.И.* Моделирование полей излучения в задачах космической спектrophотометрии // Л.: Наука. 1986. 352 с.
3. *Kondratyev K.Ya., Kozoderov V.V., Smokty O.I.* Remote Sensing of the Earth from Space: Atmospheric Correction // Springer-Verlag. 1992. 478p.
4. *Smokty O. I., Guzzi R.* The Influence of the Earth's Atmospheric Turbulence on the Optical System Resolution // Proc. Progress in Electromagnetics Research Symp. (PIERS'1994). Noordwijk. 1994. pp. 2665–2669.
5. *Smokty O.I.* The Influence of the Earth's Atmospheric Turbulence on the Space Optical System Resolution // Proc. Current Problems in Atmospheric Radiation (IRS'2012). New-York: American Inst. Phys. 2013. pp. 372–376.
6. *Kawata Y., Kusaka T., Uenno S., Smokty O.I.* Atmospheric Correction Algorithm for Remote Sensing Data with Multiviewing Angles // In: Proc. IGARSS'93. Tokyo. Japan. 1993. vol. 4. pp. 1113–1115.
7. *Исмару А.* Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах // М.: Мир. 1981. Т.1. 280 с., Т.2. 317 с.
8. *Кляцкин В.И.* Статистическое описание динамических систем с флуктуирующими параметрами // М.: Наука. 1975. 239 с.
9. *Smokty O.I., Kondratyev K.Ya.* Analytical Approximation of the Spatial Frequency Filtration of Radiation Fields for the Space Spectrophotometry Problems // Appl. Math. and Computation. 1995. vol. 80. pp. 1–17.
10. *Smokty O. I.* Applied Mathematical Problems of Satellite Data Filtration and Atmospheric Correction // In: Proc. Current Problems in Atmospheric Radiation (IRS'2000). A.Deepak Publ.Co. Hampton (USA). 2001. pp. 433–437.
11. *Татарский В.И.* Распространение волн в турбулентной атмосфере // М: Наука. 1967. 548 с.
12. *Чандрасекар С.* Перенос лучистой энергии // М.: ИЛ. 1953. 432 с.
13. *Соболев В.В.* Рассеяние света в атмосферах планет // М.: Наука, 1972, 335 с.
14. *Чернов Л.А.* Волны в случайно-неоднородных средах // М.: Наука. 1975. 174 с.
15. *Татарский В.И.* Теория флуктуационных явлений при распространении волн в турбулентной атмосфере // М.: Изд-во АН СССР. 1959. 127 с.
16. *Апресян Х. А., Кравцов Ю.А.* Теория переноса излучения // М: Наука. 1983. 216 с.
17. *Алдошина О.А., Бачериков В.В., Смоктий О.И., Фабриков В.А.* Влияние турбулентной атмосферы на формирование оптических изображений объектов // Л.: ЛИИАН. Препринт. 1991. №186. 61с.
18. *Labeyrie A.* Attainment of Diffraction Limited Resolution in Large Telescopes by Fourier's Analysis Speckle Patterns in Star Images // Astron. and Astrophys. 1970. vol. 6. pp. 85–87.
19. *Roddier F.* The Effect of Atmospheric Turbulence in Optical Astronomy // Progress in Optics. 1981. vol. XIX. pp. 283–376.
20. *Франсон М.* Оптика спеклов // М: Мир. 1980. 171с.
21. *Зув В.У., Кабанов М.В.* Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех) // М.: Советское радио. 1977. 367 с.

22. *Смокты О.И., Фабриков В.А.* Методы теории систем и преобразований в оптике // Л.: Наука. 1989. 312 с.
23. *Browne L.W., Antonia R.A., Rajagopalam S.* The Spectral Derivative of Temperature in a Turbulent Flow and Taylor's Hypothesis // *Phys. Fl.* 1983. vol. 26. no. 5. pp. 1222–1227.
24. *Клифффорд С.Ф.* Классическая теория распространения волн в турбулентной среде // В кн.: Проблемы прикладной физики. М.: Мир. 1981. Т.25. С. 18–60.
25. *Колмогоров А.Н.* Рассеяние энергии при локально-изотропной турбулентности // Докл. АН СССР. 1941. Т. 32. С. 19–21.
26. *Ламли Д., Пановский Г.* Структура атмосферной турбулентности // М.: Мир. 1966. 264 с.
27. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики // М.: Наука. 1970. 856 с.
28. *Рытов С.М.* Введение в статистическую радиофизику. Часть I. Случайные процессы // М.: Наука. 1976. 280 с.
29. *Рытов С.М., Крайцов Ю.Ф., Татарский В.И.* Введение в статистическую радиофизику. Часть II. Случайные поля // М.: Наука. 1978. 463 с.
30. *Марешаль А., Франсон М.* Структура оптического изображения // М.: Мир. 1964. 295 с.
31. *Hufnagel R.E., Stanley N.R.* Modulation Transfer Function Associated with Image Transmission through Turbulent Media // *Journ. Opt. Soc. Amer. (JOSA)*. 1964. vol. 54. no. 1. pp. 52–61.
32. *Lutomirsky R.F., Yura H.T.* Imaging of Extended Objects through a Turbulent Atmosphere // *Appl. Optics*. 1974. vol. 13. pp. 431–437.
33. *Fried D.L.* Optical Resolution through a Randomly Inhomogeneous Medium for Very Long and Very Short Exposures // *J. Opt. Soc. Amtr. (JOSA)*. 1966. vol. 56. no. 10. pp. 1372–1379.
34. *Беленький М.С., Боронаев В.В., Гамбоев Н.Ц., Миронов В.Л.* Оптическое зондирование атмосферы // Новосибирск: Наука. 1986. 91с.
35. *Smokty O. I.* Applied Mathematical Problems of Atmospheric Correction and Filtration of Multispectral Satellite Data // In: Proc. CEReS Intern. Symp. «The Atmospheric Correction of Satellite Data and Its Application to Global Environment». Chiba Univ. Japan. 1998. pp. 143–150.
36. *Elterman L.* Vertical Attenuation Model with Eight Meteorological Ranges 2 to 13 kilometers // Rep. ACCRL-70-0200. Environ. Res. Papers. Bedford. USA. 1970. vol. 318. 57p.

References

1. Kondratyev K.Ya., Smokty O.I., Kozoderov V.V. *Vliyanie atmosfery na issledovanie prirodnih resursov iz kosmosa* [Atmospheric Influence on the Natural Resources Investigation from Space]. M: Mashinostroenie. 1985. 272 p. (In Russ.).
2. Smokty O.I. *Modelirovanie poley izlucheniya v zadachakh kosmicheskoy spectrophotometrii* [Radiation Fields Modeling in the Problems of Space Spectrophotometry]. L. Nauka. 1986. 352 p. (In Russ.).
3. Kondratyev K.Ya., Kozoderov V.V., Smokty O.I. Remote Sensing of the Earth from Space: Atmospheric Correction. Springer-Verlag. 1992. 478 p.
4. Smokty O. I., Guzzi R. The Influence of the Earth's Atmospheric Turbulence on the Optical System Resolution. Proc. Progress in Electromagnetics Research Symp. (PIERS'1994). Noordwijk. 1994. pp. 2665–2669.
5. Smokty O.I. The Influence of the Earth's Atmospheric Turbulence on the Space Optical System Resolution. Proc. Current Problems in Atmospheric Radiation (IRS'2012). New-York: American Inst. Phys. 2013. pp. 372–376.

6. Kawata Y., Kusaka T., Ueno S., Smokty O.I. Atmospheric Correction Algorithm for Remote Sensing Data with Multiviewing Angles. In: Proc. IGARSS'93. Tokyo. Japan. 1993. vol. 4. pp. 1113–1115.
7. Ishimaru A. *Rasprostranenie i rasseyanie voln v sluchaino-neodnorodnykh sredakh* [Wave Propagation and Scattering in Random media]. M.: Mir. 1981. vol. 1. 280 p., vol. 2. 317 p. (In Russ.).
8. Kljatzkin V.I. *Statisticheskoe opisanie dinamicheskikh sistem s flyktuirushimi parametrami* [Statistical description of dynamical systems with the fluctuating parameters]. M.: Nauka. 1975. 239 p. (In Russ.).
9. Smokty O.I., Kondratyev K.Ya. Analytical Approximation of the Spatial Frequency Filtration of Radiation Fields for the Space Spectrophotometry Problems. Appl. Math. and Computation. 1995. vol. 80. pp. 1–17.
10. Smokty O. I. Applied Mathematical Problems of Satellite Data Filtration and Atmospheric Correction. In: Proc. Current Problems in Atmospheric Radiation (IRS'2000). A. Deepak Publ.Co. Hampton (USA). 2001. pp. 433–437.
11. Tatarskiy V.I. *Rasprostranenie voln v turbulentnoy atmosfere* [Wave Propagation in a Turbulent Atmosphere]. M.: Nauka. 1967. 548 p. (In Russ.).
12. Chandrasekhar S. *Perenos luchistoy energii* [Radiative transfer]. M.: IL. 1953. 432 p. (In Russ.).
13. Sobolev V.V. *Rasseyanie sveta v atmosferah planet* [Light Scattering in Planetary Atmospheres]. M.: Nauka. 1972. 335 p. (In Russ.).
14. Chernov L.A. *Volny v sluchaino-neodnorodnykh sredakh* [Waves in the Random-Non-uniform Media]. M.: Nauka. 1975. 174 p. (In Russ.).
15. Tatarskiy V.I. *Teoriya fluktuazionnykh javleniy pri rasprostranении voln v turbulentnoy atmosfere* [Fluctuating Phenomena Theory for Waves Propagation in the Turbulent Atmosphere]. M.: AN SSR. 1959. 127 p. (In Russ.).
16. Apresjan X.A., Kravzov I.A. *Teoriya perenosa izlucheniya* [Radiative Transfer Theory]. M.: Nauka. 1983. 216 p. (In Russ.).
17. Aldoshina O.A., Bacherikov V.V., Smokty O. I. Fabrikov V.A. *Vliyanie turbulentnoy atmosfery na formirovaniye opticheskikh izobrascheniy obyektov* [Turbulent Atmosphere Influence on the Objects Optical Images Forming]. L. LIAN. Preprint. 1991. no. 186. 61 p. (In Russ.).
18. Labeyrie A. Attainment of Diffraction Limited Resolution in Large Telescopes by Fourier's Analysis Speckle Patterns in Star Images. Astron. and Astrophys. 1970. vol. 6. pp. 85–87.
19. Roddier F. The Effect of Atmospheric Turbulence in Optical Astronomy // Progress in Optics. 1981. vol. XIX. pp. 283–376.
20. Franson M. *Optika spektrov* [Spectral optics]. M.: Mir. 1980. 17 p. (In Russ.).
21. Zuev V.E., Kabanov M.V. *Perenos opticheskikh signalov v zemnoy atmosfere (v uslovijah pomeh)* [Optical Signals Transfer in the Earth's Atmosphere (in encumbrances conditions)]. M.: Sovetskoe radio. 1977. 367 p. (In Russ.).
22. Smokty O. I., Fabrikov V.A. *Metody teorii sistem i preobrazovaniya v optike* [Systems Theory Methods and Optics Transformations]. L.: Nauka. 1989. 312 p. (In Russ.).
23. Browne L.W., Antonia R.A., Rajagopalam S. The Spectral Derivative of Temperature in a Turbulent Flow and Taylor's Hypothesis. Phys. Fl. 1983. vol. 26. no. 5. pp. 1222–1227.
24. Klifford S.F. [Classical Theory of Wave Propagation in a Turbulent Media]. In.: *Problemy prikladnoy fiziki – Applied Physics Problems*. M.: Mir. 1981. vol. 25. pp. 1–60. (In Russ.).
25. Kolmogorov A. N. *Rassejanie energii pri lokaljno-izotropnoy turbulentnosti* [Energy scattering at local-isotropic turbulence]. Dokl. AN SSR. 1941. vol. 32. pp. 19–21. (In Russ.).
26. Lamli D., Panovsky G. *Structura atmosfernnoy turbulentnosti* [The structure of

- atmospheric turbulence]. M.: Mir. 1966. 264 p. (In Russ.).
27. Born M., Volf E. *Osnovy optiki* [Optics Basics]. M.: Nauka. 1970. 856 p. (In Russ.).
 28. Rytov S.M. *Vvedenie v statisticheskuyu radiofiziku. Ch.I. Sluchaynye protsessy* [Introduction to Statistical Radiophysics. Part 1. Random processes]. M.: Nauka. 1976. 280 p. (In Russ.).
 29. Rytov S.M., Kravzov J.A. Tatarskiy V.I. *Vvedenie v statisticheskuyu radiofiziku. Ch.II. Sluchaynye polja* [Introduction to Statistical Radiophysics. Part 2. Random fields]. M.: Nauka. 1978. 463 p. (In Russ.).
 30. Marechal A., Franson M. *Struktura opticheskogo izobrascheniya* [Optical Images Structure]. M.: Mir. 1964. 295p. (In Russ.).
 31. Hufnagel R.E., Stanley N.R. Modulation Transfer Function Associated with Image Transmission through Turbulent Media. *Journ. Opt. Soc. Amer. (JOSA)*. 1964. vol. 54, no. 1. pp. 52–61.
 32. Lutomirsky R.F., Yura H.T. Imaging of Extended Objects through a Turbulent Atmosphere. *Appl.Optics*. 1974. vol. 13. pp. 431–437.
 33. Fried D.L. Optical Resolution through a Randomly Inhomogeneous Medium for Very Long and Very Short Exposures. *J.Opt.Soc.Amtr. (JOSA)*. 1966. vol. 56. no. 10, pp. 1372–1379.
 34. Belenkiy M.S., Boronae V.V., Gamboev N.Z., Mironov V.I. *Opticheskoe zondirovanie atmosfery* [Optical Remote Sensing of the Atmosphere]. Novosibirsk: Nauka. 1986. 91p.
 35. Smokty O. I. Applied Mathematical Problems of Atmospheric Correction and Filtration of Multispectral Satellite Data. In: *Proc. CEReS Intern. Symp. «The Atmospheric Correction of Satellite Data and Its Application to Global Environment»*. Chiba Univ. Japan. 1998. pp. 143–150.
 36. Elterman L. Vertical Attenuation Model with Eight Meteorological Ranges 2 to 13 kilometers. *Rep. ACCRL-70-0200. Environ. Res. Papers. Bedford. USA*. 1970. vol. 318. 57p.

Смоктый Олег Иванович — д-р физ.-мат. наук, профессор, Заслуженный Деятель Науки Российской Федерации, академик Международной Академии Астронавтики (Франция), главный научный сотрудник лаборатории прикладной информатики и проблем информатизации общества Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: теория переноса излучения, моделирование полей излучения в задачах дистанционного зондирования Земли из космоса, космическая геоинформатика. Число научных публикаций — 270 научных трудов, в том числе 10 монографий, одного открытия и 6 изобретений, e-mail: soi@iias.spb.su СПИИРАН, 14-я линия В.О., д. 39, г. Санкт-Петербург, 199178, Россия. р.т. +7-(812)-328-19-19

Smokty Oleg Ivanovich— Ph.D., Dr. Sci., professor, Honored Scientist of Russian Federation, Full Member of the International Academy of Astronautics (France), Chief Researcher at the Laboratory of Applied Informatics and Problems of Sociert Informatization of St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: Radiative Transfer Theory; Radiation Field Modeling in Problems of the Earth Remote Sensing from Space; Geoinformatics. The number of publications — 270 scientific works, including 10 monographs, 1 discovery and 6 inventions, e-mail: soi@iias.spb.su, SPIIRAS, 39,14th Line VO, 199178 St. Petersburg, Russia; office phone +7-(812)-328-19-19.

Поддержка исследований. Работа выполнена по Программе Фундаментальных исследований ОНИТ РАН и в соответствии с планом НИР СПИИРАН.

Acknowledgements. This research is supported by ONIT RAS project and as consistent with schedule of SPIIRAS research.

РЕФЕРАТ

Смоктый О.И. Влияние атмосферной турбулентности, молекулярно-аэрозольного рассеяния и параметров бортовой оптической аппаратуры на качество спутниковой видеoinформации при съемке Земли из космоса.

В настоящей работе рассмотрена важная проблема совместного влияния атмосферной турбулентности, молекулярно-аэрозольного многократного рассеяния и параметров спутникового бортового оптического прибора на качество космической видеoinформации, получаемой при дистанционном спектрофотометрировании Земли. Аналитические и численные оценки комплексной пространственно-частотной передаточной функции линейной оптической системы «атмосфера – подстилающая поверхность – бортовой прибор» выполнены в рамках концепции линейных динамических систем и Фурье-преобразований оптических сигналов. Главное заключение проведенного анализа состоит в следующем. Для дистанционного зондирования природной среды из космоса в видимой ($\lambda = 400-800$ нм) и ближней инфракрасной областях ($\lambda = 850-1500$ нм) спектра при условиях съемки в надир ($\theta = 0^\circ$), высоте орбиты космического носителя ($H_{\text{орб}} \geq 10^5$ м) и его скорости ($V \geq 10^3$ м/сек) влиянием атмосферной турбулентности, вызываемой флуктуациями показателя преломления земной атмосферы, можно пренебрегать в масштабах $\Delta > 10\mu$ по сравнению с искажениями, вызываемыми молекулярно-аэрозольным многократным рассеянием и регистрирующим бортовым прибором. Таким образом, при атмосферной коррекции спутниковой видеoinформации невысокого пространственного разрешения достаточно ограничиться рассмотрением процессов многократного некогерентного рассеяния и поглощения солнечного излучения на пути от бортового оптического регистратора до наземного (надводного) объекта.

SUMMARY

Smokty O.I. **Influence of turbulent atmosphere, molecular-aerosol scattering and on-board optical devices on the satellite video data quality at the Earth's remote sensing from space.**

Important problem of conjoint influence of atmospheric turbulence, molecular-aerosol multiple light scattering and on-board satellite optical devices' parameters on the quality of video data obtained at the Earth's spectrophotometric remote sensing from the space is considered. Analytical and numeric estimations of the complex spatial-frequency transfer function for the linear optical system "atmosphere – underlying surface – on-board device" considered in the framework of both linear dynamic systems concept and Fourier transformations of the optical signals are given. The main conclusion of given analysis is as follows. In order to carry out remote sensing of environment from space in both visual ($\lambda=400-800$ nm) and nearest infra-red ($\lambda=850-1500$ nm) spectral fields under condition of nadir survey ($\Theta = 0^\circ$), space carrier's orbit height ($H_{\text{orb}} \geq 10^5$ m) and its velocity ($v \geq 10^3$ m/sec), the atmospheric turbulence influence induced by the Earth's atmospheric refraction index fluctuations may be neglected in scale $\Delta > 10$ m in comparison with distortions induced by both molecular-aerosol multiple light scattering and registering on-board device. Therefore, in case of the atmospheric correction applied for the low-quality satellite video data spatial resolution, the analysis of solar radiance multiple non-coherent scattering and absorption processes taken on its route from on-board device to the ground-based or overwater-based object should be sufficiently used.