

УДК 004.932.2:53.082.56

КАЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ФОНОВОЙ ПОМЕХИ ДЛЯ СИСТЕМ ОПТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ В ВИДИМОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

Ошлаков В.К.

*ФГБУН Институт оптики атмосферы имени В.Е. Зуева
Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, e-mail: ovk@iao.ru*

Обсуждаются вопросы качественной оценки пассивным методом фонового шума в системах оптического мультиспектрального зондирования атмосферы в видимой области спектра на основе классификации спектральных сигналов аэрозольного и молекулярного рассеяния. Для оптоэлектронной системы видения, работающей в пассивном режиме, естественным источником оптического излучения является Солнце. В то же время при обнаружении в активном режиме объектов, находящихся на поверхности Земли, в атмосфере или за ее пределами, Солнце является наиболее мощным естественным источником фонового шума. Основными характеристиками поля рассеянного излучения являются яркость и поляризация. В видимой области спектра основной вклад в фоновую составляющую вносят процессы молекулярно-аэрозольного рассеяния. Несферические частицы в составе аэрозолей или в облаках смешанной и кристаллической структуры вносят большой вклад в деполаризацию сигналов рассеяния. Для паров воды, жидкокапельного аэрозоля или облаков жидкокапельной структуры можно ограничиться наблюдениями спектральной яркости. При обработке цветных изображений неба задачу обнаружения жидкокапельного аэрозоля предлагается решать на основе известного метода представления результатов фотометрии неба в трех спектральных интервалах (R, G, B) на трехкомпонентной диаграмме. Сделаны выводы об эффективном решении задач обнаружения облаков в поле зрения оптической системы. Алгоритмы легко программировать; время принятия решения ограничено техническими характеристиками оптико-электронной системы.

Ключевые слова: атмосфера, аэрозоль, облачность, Солнце, фотометр, мультиспектральный, изображение, цветоделенный сигнал

Работа выполнена в рамках госзадания Института оптики атмосферы Сибирского отделения Российской академии наук.

QUALITATIVE ASSESSMENT OF BACKGROUND INTERFERENCE FOR OPTICAL ATMOSPHERIC SENSING SYSTEMS IN THE VISIBLE REGION OF THE SPECTRUM

Oshlakov V.K.

*V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Tomsk, e-mail: ovk@iao.ru*

The issues of qualitative assessment by the passive method of background noise in systems of optical multispectral sounding of the atmosphere in the visible region of the spectrum based on the classification of spectral signals of aerosol and molecular scattering are discussed. For an optoelectronic vision system operating in passive mode, the natural source of optical radiation is the Sun. At the same time, when actively detecting objects located on the Earth's surface, in the atmosphere or beyond, the Sun is the most powerful natural source of background noise. The main characteristics of the scattered radiation field are brightness and polarization. In the visible region of the spectrum, the main contribution to the background component is made by molecular aerosol scattering processes. A large contribution to the depolarization of scattered signals is made by non-spherical particles in aerosols or clouds of mixed and crystalline structures. For water vapor, liquid-droplet aerosol, or clouds with a liquid-droplet structure, one can limit oneself to observations of spectral brightness. When processing color images of the sky, the problem of detecting liquid droplet aerosol is proposed to be solved on the basis of a well-known method for presenting the results of sky photometry in three spectral intervals (R, G, B) in three-dimensional space.component diagram. Conclusions are drawn about the effective solution of problems of detecting clouds in the field of view of an optical system. The algorithms are easy to program; the decision-making time is limited by the technical characteristics of the optoelectronic system.

Keywords: atmosphere, aerosol, cloudiness, Sun, photometer, multispectral, image, color-separated signal

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

В настоящее время в оптическом зондировании атмосферы используются интеллектуальные оптико-электронные системы технического зрения (ОЭС) наземного, бортового или спутникового базирования. Широко применяются ОЭС, в состав которых входят блоки передачи, приема и обработки оптического зондирующего сигнала, а так-

же широкоспектральные блоки получения изображений. В информационной цепочке эти системы являются потребителями информации от систем аттестации атмосферных трасс по оптическим признакам, в частности – информации о скоплениях в направлении визирования аэрозоля в виде дымки, пелены, тумана, облаков.

Целью данной работы является описание возможности получения качественной информации об оптическом состоянии атмосферы интеллектуальными ОЭС наземного базирования в пассивном режиме с использованием закономерностей рассеяния излучения от широкоспектральных источников.

Материалы и методы исследования

С помощью ОЭС анализируются изменения оптического спектра, связанные с изменением условий прохождения оптического сигнала на внутриатмосферной трассе [1; 2]. Для ОЭС к первостепенной относится информация о закрытости направления визирования скоплениями аэрозоля, облачностью любого типа. Как правило, при анализе и обработке результатов пассивного или активного зондирования решаются задачи обнаружения, распознавания и классификации различных внутриатмосферных объектов в смеси полезного сигнала и сигнала от фона в атмосферном канале. В этом смысле скопление аэрозолей (туман, дымка, пелена, облака жидкокапельной, кристаллической или смешанной структуры) представлены локализованными в атмосфере структурами, отличающимися по оптическим свойствам от воздуха, имеющего молекулярный состав, и ОЭС регистрируется повышение уровня фонового сигнала спектральной яркости. Получение информации об оптических характеристиках атмосферы на рабочих трассах ОЭС является актуальной задачей [3–5]. В данной работе предполагается, что информация об атмосферной фоновой помехе в выбранном направлении может быть получена ОЭС в пассивном режиме в дневное время либо в пространстве предметов – при мультиспектральном (спектрозональном) фотометрировании выбранного участка неба в определенной области спектра, либо в пространстве изображений – путем спектрозональной обработки цветных изображений неба. Для ОЭС видения, работающей в пассивном режиме, естественным источником оптического излучения является Солнце. В то же время при обнаружении в пассивном или активном режиме объектов, находящихся на поверхности Земли [6], в атмосфере [7–9] или за ее пределами, Солнце является наиболее мощным естественным источником фоновых помех. Основными характеристиками поля рассеянного в атмосфере солнечного излучения являются яркость и поляризация, при этом различаются результаты молекулярного и аэрозольного рассеяния. Вклад в деполаризацию сигналов рассеяния вносят не-

сферические частицы в составе аэрозолей или в облаках смешанной и кристаллической структуры. При обнаружении сигналов от скоплений паров воды, жидкокапельного аэрозоля, облаков жидкокапельной структуры информационным признаком выберем изменения в спектральной яркости рассеянного излучения за счет изменений соотношений в составе молекулярно-аэрозольной атмосферы. Большую роль в формировании яркостного фона при наблюдении облачности играет отраженное от подстилающей поверхности солнечное излучение.

Независимо от метода получения информации (в пространстве предметов или в пространстве изображений) об изменениях оптического спектра, связанных с изменением условий прохождения оптического сигнала на внутриатмосферной трассе, методы решения задач обнаружения объектов с заданными или неизвестными априори спектральными свойствами соответствуют статистическим методам решения задач классификации, распознавания образов и принятия решений в условиях неопределенности [10, с. 74; 11]. Если некоторый класс объектов представлен детерминированным спектральным признаком или признаком, полученным в результате усреднения большого числа спектров (статистика 1-го порядка), то алгоритмы обработки информации могут быть достаточно простыми. Например, определение спектральных отношений (отношений сигналов, приходящихся на отдельные спектральные рабочие диапазоны) может вестись путем квантования по уровню или путем использования линейных дискриминантных функций [1; 11].

Согласно [12, с. 326], мощность фоновой помехи для приемника с узким полем зрения и узкополосным фильтром равна

$$P_{\phi\lambda} = L_{\phi\lambda} T_n \Delta\lambda \pi r_n^2 \Omega_n, \quad (1)$$

где $L_{\phi\lambda}$ – спектральная яркость фоновой помехи на длине волны λ ; T_n – коэффициент пропускания приемной оптической системы ОЭС; $\Delta\lambda$ – полоса пропускания фильтра; r_n – радиус апертуры приемника; Ω_n – телесный угол поля зрения приемника ОЭС.

При описании спектральной яркости фоновой помехи в молекулярно-аэрозольной атмосфере $L_{\phi\lambda}$ будем учитывать два предельных случая – яркость излучения в условиях высокой прозрачности атмосферы (минимум содержания водяных паров и др. примесей, т.е. приближение к молекулярной атмосфере) и яркость в условиях сплошной облачности (аэрозольное рассеяние на каплях воды в мощном облачном слое). В [12, с. 320], в приближении одно-

кратного рассеяния в атмосфере высокой прозрачности, яркость нисходящего фонового излучения представлена в виде

$$L_{\phi\lambda}(\tau, \theta, \varphi) = 0,25 \lambda_s S_\lambda \chi(\gamma) \frac{\cos \theta_0}{\cos \theta - \cos \theta_0} \left[\exp\left(-\frac{\tau_{0\lambda} - \tau_\lambda}{\cos \theta}\right) - \exp\left(-\frac{\tau_{0\lambda} - \tau_\lambda}{\cos \theta_0}\right) \right], \quad (2)$$

где λ_s – отношение показателя рассеяния аэрозольной земной атмосферы к показателю ослабления, в видимой области спектра $\lambda_s \cong 1$; πS_λ – спектральная солнечная постоянная на длине волны λ ; $\chi(\gamma)$ – индикатриса рассеяния в атмосфере; γ – угол рассеяния:

$$\cos \gamma = \cos \theta \cos \theta_0 + \sin \theta \sin \theta_0 \cos(\varphi - \varphi_0);$$

где θ, φ – зенитный угол и азимут направления визирования; $\theta_0, \varphi_0 = 0$ – зенитный угол и азимут Солнца; $\tau_{0\lambda}$ и τ_λ – оптические толщи всей атмосферы и между приемником и подстилающей поверхностью, при минимальном вкладе аэрозольной составляющей.

В атмосфере высокой прозрачности преобладает молекулярное рассеяние коротковолновой части солнечного излучения, что выражается в синем цвете безоблачного неба.

Там же, [12, с. 325], яркость нисходящего фонового излучения пропущенного однородным облачным слоем в рассеивающей атмосфере и при отражении от ламбертовской поверхности оценивается по приближенной формуле В.В. Соболева:

$$L_{\phi\lambda}^* = S_\lambda \cos \theta_0 \frac{\left[(1 - A_\lambda) \left(1 + \frac{3}{2} \cos \theta \right) + 2A_\lambda \right] \left(1 + \frac{3}{2} \cos \theta_0 \right)}{4 + (3 - \mu)(1 - A_\lambda) \tau_{0\lambda}^*}, \quad (3)$$

где μ – параметр, характеризующий вытянутость индикатрисы рассеяния (для дымки: $\mu = 0,1 \dots 0,6$ рад, для крупнодисперсных туманных дымок: $\mu = 0,16 \dots 0,18$ рад; для жидкокапельных туманов: $\mu = 0,06 \dots 0,08$ рад; индикатриса $\chi(\gamma) = \frac{2}{\mu^2} \exp(-\frac{\gamma}{\mu})$ для крупных частиц не зависит от длины волны; A_λ – альbedo подстилающей земной поверхности; $\tau_{0\lambda}^*$ – оптическая толщина, формируемая в молекулярно-аэрозольной атмосфере.

Здесь интересно отметить следующее. В общем случае оптическая толщина в (2), (3) определяется как

$$\tau = \int_h^\infty k dh,$$

где h – высота, k – коэффициент ослабления, в нашем случае смысл коэффициента рассеяния σ , вклад эффекта молекулярного поглощения принято считать минимальным. В соответствии с теорией Ми коэффициент рассеяния определяется как

$$\sigma = N_a \int_0^\infty (\pi a^2) Q_\rho(\rho, m) f(a) da, \quad (4)$$

где N_a – количество частиц, $f(a)$ – функция распределения частиц по размерам, m – показатель преломления вещества, из которого состоят частицы, Q_ρ – фактор эффективности рассеяния, параметр $\rho = 2\pi(a/\lambda)$ (a – размер частицы, λ – длина волны).

При распространении оптического излучения в тумане и облаках, где размеры частиц заключены примерно в интервале 1–10 мкм, параметр $\rho \gg 1$ и фактор эффективности рассеяния в (4) $Q_\rho(\rho, m) \cong 2$. Таким образом, коэффициент рассеяния $\sigma = 2S_a$ количественно определяется величиной геометрического сечения частиц S_a в единице объема и не зависит от длины волны. Неселективность рассеяния света на таких частицах определяет типичный белесый цвет облаков и туманов.

Для оценки изменений в спектральном распределении энергии излучения используются трехкомпонентные диаграммы (ТКД) [10, с. 30]. В ТКД координатами являются цветоделенные сигналы m, n, l – отношения сигналов, зарегистрированных в каждом из трех спектральных поддиапазонов (условно: *Red, Green, Blue*), к суммарному (по спектру) сигналу. В нашем случае координаты точек цветности фона m, n, l на ТКД можно представить через отношения значений мощности фоновой помехи (1) в трех спектральных участках:

$$m = \frac{P_{\phi\lambda 1}}{\sum_i P_{\phi\lambda i}}, \quad n = \frac{P_{\phi\lambda 2}}{\sum_i P_{\phi\lambda i}}, \quad l = \frac{P_{\phi\lambda 3}}{\sum_i P_{\phi\lambda i}}, \quad (5)$$

где $i = 1, 2, 3$ – номера спектральных каналов ОЭС (условно: *Red, Green, Blue*), λ_i – соответствующие длины волн (спектральные поддиапазоны).

Если допустить, что в (1) T_n , $\Delta\lambda$, r_n , Ω_n – константы для данной ОЭС, то отношения (5) перепишутся в виде

$$m \cong \frac{L_{\phi\lambda 1}}{\sum_i L_{\phi\lambda i}}, n \cong \frac{L_{\phi\lambda 2}}{\sum_i L_{\phi\lambda i}}, l \cong \frac{L_{\phi\lambda 3}}{\sum_i L_{\phi\lambda i}} \quad (5.1)$$

где L_{ϕ} определяется выражениями (2), (3).

Зависимость от длины волны в (2) выражена через значения спектральной солнечной постоянной и оптических толщ. Зависимость от длины волны в (3) выражена через значения спектральной солнечной постоянной, оптических толщ и альbedo подстилающей поверхности. Очевидно, что в относительных значениях координат точек цветности (5.1) будет отражена спектральная зависимость входных сигналов от смеси оптических толщ молекулярного и аэрозольного рассеяния (значения которых для предельных случаев (2), (3) могут отличаться на один-два порядка). Следовательно, на основе анализа положения точки «цветности» на ТКД можно делать вывод об обнаружении сигналов, соответствующих увеличению в составе атмосферы содержания паров воды, жидкокапельного аэрозоля.

Результаты исследования и их обсуждение

Метод получения информации – фотометрирование и фотографирование неба в выбранном направлении

На рис. 1 представлены спектры и фотографии отдельного участка неба, полученные в осенний период в г. Томске при совпадающих положениях Солнца. Наблюдения проводились с помощью упрощенной модели ОЭС в составе телескопа и цифровой фотокамеры, смонтированных на двухкоординатной платформе с фиксацией угловых координат вручную, быстродействующего спектрометра, компьютера. Телескоп с кварцевой оптикой, углом поля зрения 0,04 рад, соединялся с помощью световода со спектрометром OceanOptics HR4000, работающего под управлением лицензионного ПО *SpectraSuite*.

Цифровая фотокамера, расположенная на одной платформе с телескопом, обеспечивала цветные изображения неба в направлении наблюдения (вставки на рис. 1). Время наблюдения, координаты направления наблюдения в разные дни выбирались для совпадающих значений положения Солнца и не менялись в процессе эксперимента. Для разных погодных условий производились записи спектра в диапазоне длин волн от 200 до 1100 нм. Время накопления одной реализации составляло 100 мс. На-

блюдения сопровождалась фотографиями неба и визуальной оценкой наблюдаемой ситуации. Из набора результатов наблюдений выбраны типичные ситуации: дымка (рис. 1, а), пелена (рис. 1, б), пелена и кучевая облачность (рис. 1, в), сплошная слоистая облачность и кучево-дождевые облака (рис. 1, г).

На рис. 2 представлены сглаженные и нормированные на максимальные значения спектры (рис. 1), сравнение которых проводится по уровню 0,5 (пунктирная линия). Обработка проведена в среде *OriginPro*.

На рис. 1 и 2 заметно изменение соотношений между «коротковолновой» и «длинноволновой» частями видимой области спектра (уширение спектров) в зависимости от размера, количества и качества частиц в составе атмосферных аэрозолей. Наиболее наглядно это заметно на рис. 2, где представлены сглаженные и нормированные на максимальные значения спектры, сравнение которых проводится по уровню 0,5 (пунктирная линия).

Эффект изменения ширины спектров в видимой области по полувысоте в зависимости от изменения состава молекулярно-аэрозольной атмосферы поясняет формулирование информационных признаков и правил принятия решений в задаче обнаружения облачности (аэрозоля) в направлении наблюдения при обработке результатов фотометрирования.

На представленных на рис. 1, 2 спектрах яркости в видимой области заметно перемещение максимальных значений из «коротковолнового» поддиапазона в более «длинноволновой», при изменении оценок состава аэрозольно-молекулярной атмосферы в сторону увеличения влагосодержания воздуха: дымка => туманная дымка => пелена => крупные капли (облачность жидкокапельной структуры). Как следствие, изменяются, в сторону увеличения, значения оптической толщи атмосферы в (2) и (3). В зависимости от изменения размера частиц a и, следовательно, параметра ρ в (4), мода в спектре рассеянного в направлении наблюдателя широкоспектрального (солнечного) излучения, будет перемещаться из «коротковолновой» области (синий цвет неба, молекулярная атмосфера) в «длинноволновую» (аэрозольная атмосфера, «белые» облака), совпадая со спектром излучения Солнца для некоторого класса аэрозольных частиц. Зарегистрированные эффекты уширения спектров яркости и перемещения максимальных значений в спектральных распределениях (рис. 2) могут служить дополнительными информационными признаками в правилах принятия решений об оптическом состоянии направлений визирования ОЭС.

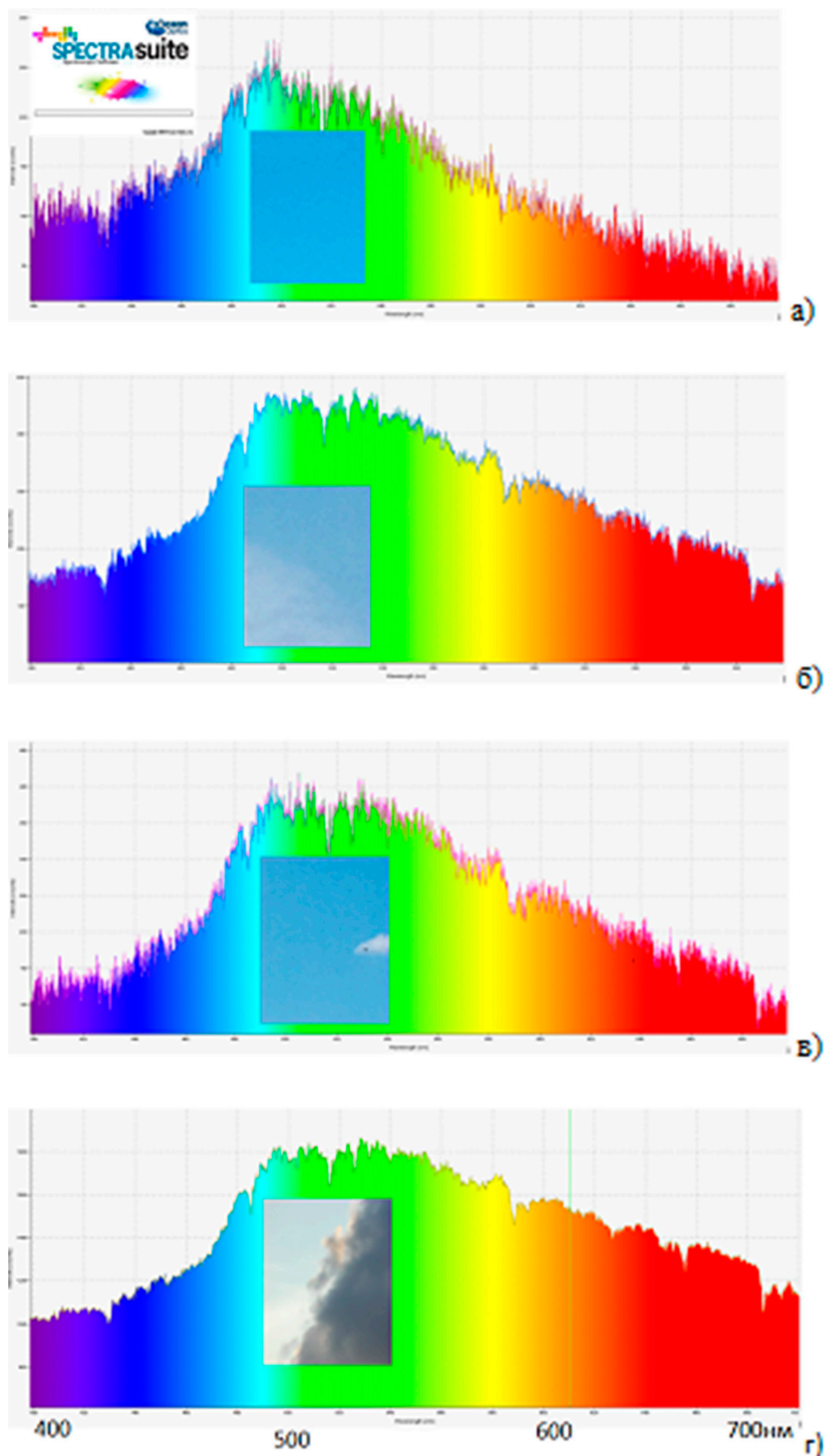


Рис. 1. Спектры яркости атмосферы в видимой области (400–700 нм) в выбранном направлении (источник – Солнце, спектрометр OceanOptics HR4000) при различных метеоситуациях.

На вставках – фотографии участков неба в направлении фотометрирования:

- а – дымка, б – плотная дымка, пелена, в – пелена + кучевая облачность,
- г – сплошная слоистая облачность и дождевые облака

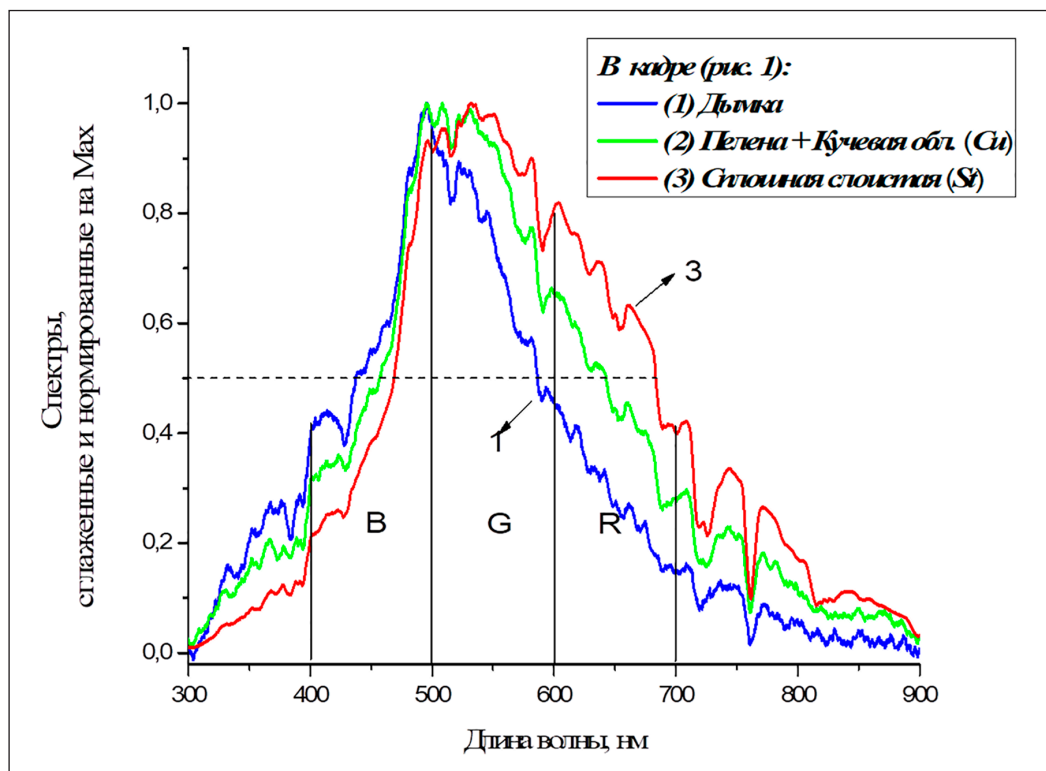


Рис. 2. Примеры сглаженных и нормированных на максимальные значения спектров рассеянного солнечного излучения для различных метеоситуаций при наблюдении в совпадающих направлениях относительно положения Солнца.

Кривая 1 – дымка (рис. 1, а), 2 – пелена, кучевая облачность *Ci* (рис. 1, в), 3 – сплошная слоистая облачность *St*. Пунктирной линией отмечен уровень 0,5; вертикальными линиями отмечены условные границы спектральных поддиапазонов *R*, *G*, *B*

Метод получения информации – обработка цветных фотографий участков неба в выбранном направлении

Анализ и обработка фрагментов многопиксельных цветных изображений неба (вкладки на рис. 1) проводилась в среде *MathCad*. Напомним, что в этом случае цветное изображение может быть представлено в виде таблиц, соответствующих *R*, *G*, *B* составляющим, с возможностью независимой обработки таблиц и восстановления полноцветного изображения. На рис. 3 представлены проекции распределения точек цветности в пространстве *m*, *n*, *l* ТКД (5.1) на плоскость *m*, *l*. Каждая точка – результат усреднения значений *R*, *G*, *B* в многопиксельных изображениях неба. На ТКД (рис. 3) также отмечено положение соответствующих точек (модели), рассчитанных по формулам (2), (3), (5.1) с учетом средне-сезонных значений оптических толщ, индикатрис, альбедо [13]. Результаты обработки цветных фотографий в трех спектральных

зонах, представленные на рис. 3, практически совпадают с результатами, полученными ранее автором при обработке множества исходных временных рядов фотометрирования зенита облачного неба в трех узких спектральных интервалах ($\lambda_1 = 0,42$, $\lambda_2 = 0,53$, $\lambda_3 = 0,69$ мкм) в различных метеоусловиях [11]: результаты (координаты точек цветности) располагаются вдоль линии регрессии, проходящей и через расчетные точки, соответствующие моделям молекулярного или аэрозольного рассеяния. Это также показано автором в данной статье: тонкая линия на рис. 3 соединяет точки, характеризующие высокую прозрачность и сплошную облачность (цветные точки на рис. 3). Эффект «разброса» значений координат точек цветности на ТКД объясняется увеличением вклада длинноволнового излучения в составе рассеянного в сторону наблюдателя спектра в результате «обогащения» спектра размеров атмосферных частиц: от полного отсутствия аэрозольных частиц до сильно загрязненной атмосферы [13].

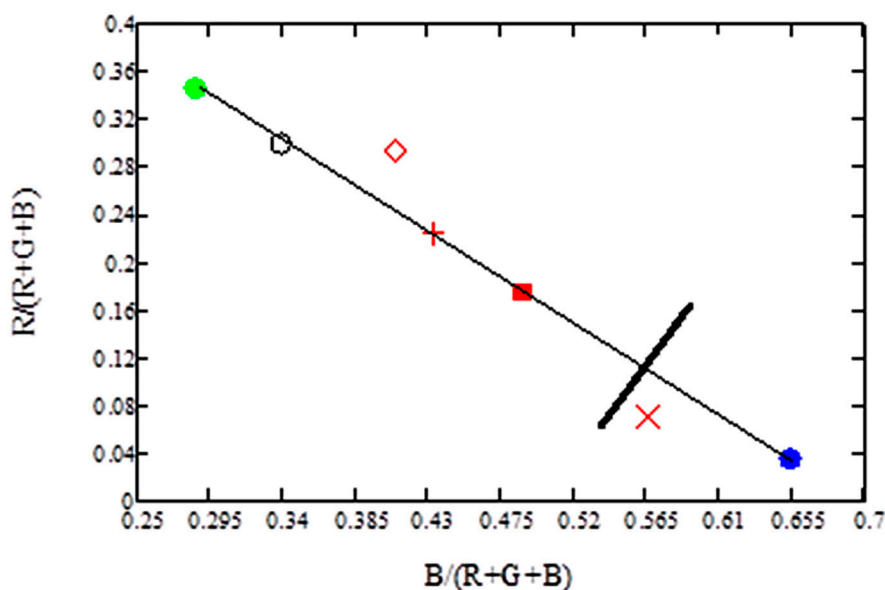


Рис. 3. Трёхкомпонентная диаграмма результатов обработки цветных изображений (вклады на рис. 1) и модельных представлений.

Модели: высокая прозрачность (приближение к молекулярному рассеянию) – синий круг; облака над сушей (слоистая облачность St , 10 баллов) – зеленый круг; по таблице значений солнечной постоянной (аэрозольная атмосфера) – белый круг. Обработка фотографий: дымка (рис. 1, а) – косой крест; пелена + кучевое облако $Сu$ (рис. 1, в) – красный квадрат; плотная дымка, пелена (рис. 1, б) – прямой крест; перисто-кучевая облачность – незакрашенный ромб

Ранее автором [11] в результате анализа результатов фотометрирования дневного неба, представленных на ТКД, сформулировано правило принятия решений в задаче дихотомии: разделении пространства цветных координат на два класса – отсутствие облачности (высокая прозрачность, слабая дымка) и класс, содержащий подпространства плотная дымка, пелена, жидкокапельное облако. Соответственно, толстая линия на рис. 3 – условное разделение пространства принятия решений на ТКД по результатам обработки цветных изображений на два подпространства – «высокая прозрачность, слабая дымка» и «плотная дымка, пелена, облачность». Напомним, что положение разделяющей прямой и формулировка решающего правила зависят от требований потребителя информации и от технических характеристик конкретной ОЭС.

Важно отметить, что по расположению на ТКД (рис. 3) точек цветности в результате обработки цветного изображения неба, аналогично результатам обработки спектров яркости наблюдаемых в трех длинах волн, решается задача дихотомии: в направлении наблюдения яркость фона формируется либо преобладающим молекулярным рассеянием (вывод – «чистое небо, направление открыто для работы ОЭС»),

либо в комбинации с рассеянием от жидкокапельного аэрозоля (вывод – «яркий фон: в направлении работы ОЭС облако, пелена, плотная дымка»). Дополнительно решается задача оценки вероятности закрытости направлений работы ОЭС путем подсчета отклонения числа попаданий в заданный интервал на ТКД (в подпространстве «яркий фон») к общему числу наблюдений.

Заключение

В данной работе различия в спектральных отношениях (отношениях сигналов, приходящихся на отдельные спектральные рабочие диапазоны) используются в качестве основных информационных признаков в задачах качественной оценки фоновой помехи для систем оптического зондирования атмосферы в видимой области спектра.

Информация о фоновой помехе, в том числе о наличии облачности, может быть получена в пассивном режиме работы ОЭС либо в пространстве предметов – в виде результатов фотометрических наблюдений на отдельных длинах волн в выбранном угловом направлении, либо в пространстве изображений – в виде результатов обработки цветных (R, G, B) фото- и видеоизображений. Независимо от метода получения информации об изменениях оптического

спектра, связанных с изменением условий прохождения оптического сигнала на внутриатмосферной трассе, отличительной особенностью обсуждаемой качественной оценки состояния атмосферы пассивным методом является использование широко-спектральных распределений зондирующего излучения и отображение результатов регистрации спектральных распределений яркости фона на ТКД. Для принятия решений необходимо наличие спектров сравнения – спектра рассеяния излучения широко-спектрального источника в молекулярной атмосфере (рэлеевское рассеяние) и спектра рассеяния излучения в аэрозольной атмосфере (рассеяние Ми, спектр солнечной постоянной). Очевидно, что линия разделения в пространстве принятия решений на ТКД – решение задачи дихотомии, качественной оценки фоновой помехи – должна быть расположена в соответствии с техническими требованиями к соотношению сигнал/шум конкретной ОЭС. Параллельно решается задача о вероятности закрытости направления визирования скоплениями аэрозоля, облачностью любого типа

Использование природных источников широко-спектрального излучения и оптоэлектронных систем технического зрения, с привлечением известных методов обработки и анализа цветных (мульти-спектральных) изображений, дает возможность эффективно и достаточно просто решать задачу обнаружения в атмосфере скоплений жидкокапельного аэрозоля методами пассивного оптического зондирования в видимой области спектра. Алгоритмы легко программируются, принятие решений возможно в режиме реального времени и ограничивается техническими характеристиками ОЭС.

Список литературы

1. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Многоспектральные оптико-электронные системы // Специальная техника. 2002. № 4. С. 56–62.
2. Маричев В.Н., Бочковский Д.А., Елизаров А.И. Оптические характеристики стратосферного аэрозоля Западной Сибири по результатам лидарного мониторинга в 2010–2021 гг. // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35, № 9. С. 717–721. DOI: 10.15372/AOO20220904.
3. Зуев С.В., Гочаков А.В., Красненко Н.П., Колкер А.Б. Применение RGB- и вейвлет-методов для инструментального определения общего балла облачности // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 9. С. 846–848.
4. Sun W., Wang H., Sun C., Guo B., Jia W., Sun M. Fast single image haze removal via local atmospheric light veil estimation. *ComputElectr Eng.* 2015. № 46. P. 371-383. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2015.02.009.
5. Luzón-González R., Nieves J.L., Romero J. Recovering of weather degraded images based on RGB response ratio constancy // *Applied Optics.* 2015. Vol. 54, Is. 4. P. B222–B231. DOI: 10.1364/AO.54.00B222.
6. Денисова А.Ю., Егорова А.А., Сергеев В.В., Кавеленова Л.М. Выработка требований к мульти-спектральным данным дистанционного зондирования Земли в задаче экспертизы зарастания пахотных земель древесно-кустарниковой растительностью // Компьютерная оптика. 2019. Т. 43, № 5. С. 846–856. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-5-846-856.
7. Криницкий М.А., Синицын А.В. Адаптивный алгоритм оценки общего балла облачности над морем по широкоугольным снимкам неба // Океанология. 2016. № 56 (3). С. 341–345. DOI: 10.7868/S0030157416020131.
8. Белов В.В., Абрамочкин В.Н., Гриднев Ю.В., Кудрявцев А.Н., Козлов В.С., Рахимов Р.Ф., Шмаргунов В.П., Тарасенков М.В. Экспериментальные исследования влияния оптических характеристик среды на качество изображения в ОЭС видения с селекцией помехи обратного рассеяния // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30, № 4. С. 285–290. DOI: 10.15372/AOO20170404.
9. Николаева О.В. Алгоритм обнаружения облачных объектов на много-спектральных снимках // Компьютерная оптика. 2022. Т. 46, № 5. С. 808–817. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1076.
10. Быков Р.Е., Гуревич С.Б. Анализ и обработка цветных и объемных изображений. М.: Радио и связь, 1984. 248 с.
11. Ошлаков В.К. Определение наличия облачности на линии визирования по результатам фотометрирования // Оптика атмосферы и океана. 1990. Т. 3, № 4. С. 431–434.
12. Козинцев В.И., Белов М.Л., Орлов В.М., Городничев В.А., Стрелков Б.В. Основы импульсной лазерной локации: учебное пособие для вузов / Под ред. Рождествина В.Н. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 512 с.
13. Гинзбург А.С., Мельникова И.Н., Самуленков Д.А., Сапунов М.В., Катковский Л.В. Простая оптическая модель безоблачной и облачной атмосферы для расчета потоков солнечной радиации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 2. С. 132–149. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-132-149.