

МЕТОДИКА И АЛГОРИТМ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРЫ ПУТЕМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА СПЕКТРАЛЬНОЙ ЯРКОСТИ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

А.Ш. МЕХТИЕВ, А.А. МЕХТИЕВА

Азербайджанское Национальное Аэрокосмическое Агентство
370106, Баку, пр. Азадлыг, 159

В работе предлагается методика атмосферной коррекции аэрокосмических данных, полученных посредством дистанционного зондирования объектов исследования, на основе альтернативного подхода параметризации КСЯ системы атмосфера - подстилающая поверхность.

Проблема учета влияния атмосферы при дистанционном зондировании подстилающей поверхности со значительных высот представляет большой интерес. Само решение проблемы учета атмосферы исключительно по данным дистанционных измерений без привлечения априорной информации о зондируемых на Земле растительных объектах не имеет особой перспективы. Поэтому требуется наложение функциональных ограничений на область возможных измене-

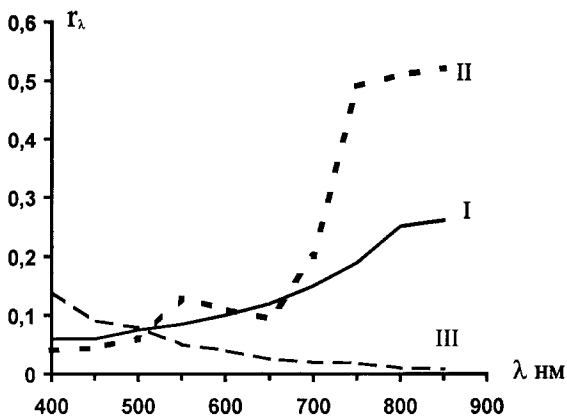


Рис. Спектральные коэффициенты яркости различных подстилающих поверхностей по классам: I - обнажения и почвы; II - растительные образования; III - водная поверхность, снежный и облачный покров.

ний спектральных образов объектов подстилающей поверхности (ПП) и атмосферы (А).

Известно, что область изменения молекулярного рассеяния для любого региона ничтожно мала и может быть рассчитана заранее с помощью предварительного разделения по методу Гордона [1]. Даже грубыми методами, без учета влияния атмосферы можно распознавать почвенные, растительные и водные объекты, пользуясь существенными отличиями спектральной формы их коэффициентов отражения в видимом и БИКР диапазонах (рис.).

Так как, спектральные образы каждого из объектов подчиняются определенным закономерностям, становится ясной необходимость привлечения естественных допущений и предположений.

Используем один из наиболее известных методов оперативной атмосферной коррекции, предложенный Гордоном [1]. По Гордону яркость атмосферной дымки можно представить в виде:

$$\rho^0(\theta_\odot, \theta, \tau) \approx \rho^0(\theta_\odot, \theta, \tau_R) + \rho^0(\theta_\odot, \theta, \tau_a) \quad (1)$$

где τ_R и τ_a - рэлеевская и аэрозольная оптические толщины соответственно, причем $\tau = \tau_R + \tau_a$; θ_\odot, θ - зенитные углы Солнца и наблюдения.

Приближение (1), на наш взгляд, желательно представить в следующем уточненном виде:

$$\rho^0(\theta_\odot, \theta, \tau_R, \tau_a) = \rho^0(\theta_\odot, \theta, \tau_R, \bar{\tau}_a) - \rho^0(\theta_\odot, \theta, \bar{\tau}_a) + \rho^0(\theta_\odot, \theta, \tau_a) \quad (2)$$

Ошибки от представления в виде (2) меньше ошибки представления в виде (1) в $(1 - \tau_a/\tau_a)$ раз.

Рассмотрим потоки диффузного излучения в плоскопараллельной атмосфере с черным дном:

$$t(\tau, \theta_\odot) + v(\tau, \theta_\odot) = 1 - e^{-\tau/\mu_\odot} - R(\tau, \theta_\odot) \quad (3)$$

Здесь t - пропущенный относительный атмосферой поток

на уровне ПП; v - отраженная от системы атмосфера-ПП часть относительного потока на верхней границе атмосферы без учета отраженного от поверхности излучения; $e^{-\tau/\mu_\odot}$ - коэффициент пропускания прямой радиации; $R(\tau, \theta_\odot)$ - поглощенная в атмосфере часть излучения.

Приближенная формула для расчета $R(\tau, \theta_\odot)$ приведена в [2]:

$$R(\tau, \theta_\odot) = (1 - \bar{W}) \left\{ \left[\left(1 + \frac{3}{2} \mu_\odot \right) + (1 - 3 \mu_\odot^2) \right] - \left[\tau \left(1 - \frac{3}{2} \mu_\odot \right) + (1 - 3 \mu_\odot^2) \right]^{-\tau/\mu_\odot} \right\} \quad (4)$$

где \bar{W} - вероятность выживания кванта при однократном рассеянии.

Для величин $t(\tau, \theta_\Theta)$ и $v(\tau, \theta_\Theta)$ в результате преобразований мы получаем выражения:

$$t(\tau, \mu_\Theta) = K(\tau, \theta_\Theta) [t(\tau_R, \theta_\Theta) + t(\tau_a, \theta_\Theta)] \quad (5)$$

$$v(\tau, \mu_\Theta) = K(\tau, \theta_\Theta) [v(\tau_R, \theta_\Theta) + v(\tau_a, \theta_\Theta)] \quad (6)$$

Через $K(\tau, \theta_\Theta)$ обозначен поправочный коэффициент, уточняющий метод Гордона.

Расчеты для наиболее часто встречающихся значений τ_R и τ_a в интервале 0.1-1 показывают, что для $\theta_\Theta=0$ значения K принимают близкие к 1, а при низкой высоте Солнца эти значения сильно отличаются от 1, но при этом K слабо зависит от τ_a .

$$\rho^0(\theta, \theta_0) = v(\tau_R, \theta_\Theta) \cdot K(\tau_R, \bar{\tau}_a, \theta_\Theta) \tilde{\rho}_R(\theta, \varphi, \theta_\Theta, \varphi_\Theta) + v(\bar{\tau}_a, \theta_\Theta) K(\tau_a, \tau_R, \theta_\Theta) \tilde{\rho}_a(\theta, \varphi, \theta_\Theta, \varphi_\Theta) \quad (8)$$

Сделаем соответствующие подстановки и переведем известные компоненты в левую часть уравнения:

$$\Delta\rho(\theta, x, y) = v(\bar{\tau}_a, \theta_\Theta) K(\bar{\tau}_a, \tau, \theta_\Theta) \tilde{\rho}_a(\theta, \varphi, \theta_\Theta, \varphi_\Theta) + \frac{t(\theta_\Theta)}{1 - A_\Phi a_s} \cdot \frac{A_\Phi(\theta, x, y)}{\pi} [t_\lambda(\theta) - e^{-\tau_\lambda/\cos\theta}] + \frac{t(\theta_\Theta)}{1 - A_\Phi a_s} \cdot r(\theta, x, y) \cdot e^{-\tau/\cos\theta} \quad (9)$$

Таким образом, конечное уравнение связывает измеряемую величину и величину, зависящую от рэлеевского рассеяния, которая довольно точно может быть рассчитана, а также аэрозольную компоненту атмосферной дымки и величины, связанные с ПП.

Представим спектральный ход аэрозольной оптической толщины в двухпараметрическом виде [5]:

$$\tau_a(\lambda) = \tau_{a\lambda_0} \left[\frac{\lambda}{\lambda_0} \right]^{-\alpha} \quad (10)$$

где $\tau_{a\lambda_0}$ - значение τ_a при фиксированной λ_0 , α - степенной показатель, близкий к 1.

Существенным является предположение относительно формы параметризации КСЯ ПП. Как было сказано выше, по многоспектральным спутниковым измерениям можно четко разделить почвенные, растительные и водные объекты ландшафта. Таким образом, допускаем, что известен тип объекта. Почвы и зеленые растительные объекты имеют характерные спектры отражения, и их с высокой точностью можно представить в двухпараметрической форме следующего вида:

$$r(\lambda) = c_1 \cdot r_0(\lambda) + c_2 \quad (11)$$

где $r_0(\lambda)$ - известная функция для каждого типа растительности и почвы; c_1 и c_2 - параметры, определяющие текущее состояние ПП.

Таким образом, все составляющие неизвестные переменные, входящие в уравнение трансформации излуче-

В ранее опубликованных работах [3] нами была предложена линейризация уравнения переноса радиации для выходящих из границ плоско-параллельной атмосферы излучений. Сделаем предположение, позволяющее ослабить ошибки при линейризации. Используя предположение о разделяемости спектрально-углового хода яркости атмосферной дымки [4], КСЯ представим как:

$$\rho^0(\tau, \theta, \theta_\Theta) = v(\tau, \theta_\Theta) \tilde{\rho}(\theta, \theta_0) \quad (7)$$

где $v(\tau, \theta_\Theta)$ - отраженный атмосферой поток является функцией оптической толщины и угла Солнца, а $\tilde{\rho}(\theta, \theta_0)$ не зависит от оптических параметров среды и является только функцией углов освещения и отражения.

С учетом (5) и (6) и условий нормировки $\tilde{\rho}(\theta, \theta_0)$ получаем:

ни, в (9) параметризованы. Оптическая толщина аэрозоля является единственно неизвестным параметром атмосферы. Параметры молекулярного ослабления и индикатрисы аэрозольного рассеяния без ограничения точности определения искоемых параметров можно взять из региональных моделей [6]. На основе представления (11) два неизвестных параметра определяют состояние ПП.

Алгоритм атмосферной коррекции, построенный в виде итерационной процедуры, приведен ниже. Обычно три или четыре итерации достаточны для получения приемлемых результатов, сравнимых с ошибками спектрофотометрического оборудования порядка 5-10 %.

Алгоритм апробирован при обработке данных многоканальных съемок спектрально-анализирующим фотоаппаратом МКФ-6 на тестовых участках Набраньского и Шеки-Закатальского подспутникового полигона на совмещенных экспериментах.

Разработанный алгоритм обладает рядом преимуществ по отношению к существующим методикам коррекции атмосферных искажений. В первую очередь данный алгоритм не требует измерений со специализированным оборудованием и ориентирован на данные стандартных спектрофотометрических средств. Предлагаемый алгоритм вобрал в себя практически все преимущества известных и широко используемых методик с уточнениями последних. Это касается методики Гордона, параметрических формул Кээвалик и аналитических приближений для коэффициентов отражения анизотропно рассеивающей атмосферы с неортогтропной ПП. Требуемая ап-

Блок-схема алгоритма программы атмосферной коррекции

1. Создание банка расчетных данных: потоков уходящей радиации рэлеевской атмосферы $F_{\lambda}^{\uparrow}(\tau_R, \theta_{\Theta})$, для сезонно-региональных значений аэрозольного ослабления атмосферы $F_{\lambda}^{\uparrow}(\tau_a, \theta_{\Theta})$, коэффициентов отражения $r_{\lambda}(\theta_{\Theta}, \theta)$, поправочных коэффициентов $K_{\lambda}(\tau_a, \tau_R, \theta_{\Theta})$, интенсивностей уходящего излучения рэлеевской атмосферы $\tilde{\rho}_{\lambda}(\theta_{\Theta}, \theta, \varphi, \tau_R)$, нормированных на единицу углового распределения интенсивностей уходящего излучения аэрозольной атмосферы $\tilde{\rho}_{\lambda}(\theta_{\Theta}, \theta, \varphi)$.

Этот этап коррекции предусматривает учет атмосферы для среднестатистической или региональной модели атмосферного аэрозоля и высоты местности над уровнем моря.

2. Классифицируется многоспектральная панорамная информация по комбинированным признакам на пространственные участки с однородными свойствами.

Этот этап можно назвать распознаванием однотипных элементов ландшафта. Каждый из однородных участков состоит из элементов одного ландшафтного типа с возможно разными состояниями (т.к. растительность с переменчивым проективным покрытием)

3. Из числа распознанных почвено-растительных объектов выбираются участки с наиболее высоким и низким относительными значениями проективного покрытия. Если пространственное разрешение спутникового оборудования имеет порядок около 20 метров (например, спутники серии SPOT), то распознанные группы близкорасположенных деревьев можно считать за РП с единичным проективным покрытием. Дальнейшие процедуры проводятся над найденными участками и требуют информацию минимум в трех спектральных диапазонах.

4. Во всех спектральных зонах на основе вышерассмотренных выражений вычитывается часть яркости за счет молекулярного рассеяния:

$$\rho_{\lambda}(\tau_R^{\lambda}, \theta, \theta_{\Theta}) = v_{\lambda}(\tau_R, \theta_{\Theta}) \cdot K_{\lambda}(\tau_R, \tau_a, \theta_{\Theta}) \cdot \tilde{\rho}_{\lambda}(\tau_R, \theta_{\Theta}, \theta, \varphi)$$

5. Подбирается вид спектрального хода КСЯ растительности $r_0(\lambda)$.

6. В нулевом приближении оптическая ситуация для аэрозольного ослабления берется из банка региональной модели в рассматриваемых диапазонах спектра.

7. Вычисляются все функции от оптической толщины, входящие в результирующее выражение для .

8. Определяются c_1, c_2 методом наименьших квадратов (МНК) по многоспектральным данным.

9. Учитывая полученные значения КСЯ в формуле (9), вычисляем яркость аэрозольной дымки.

10. По построенным невязкам $\delta\rho_{\lambda}^0 = \rho_{\lambda}^0(\tau_a(j), \theta, \theta_{\Theta}, \varphi) - \rho_{\lambda}(\tau_a(j-1))$, (где j - номер итерации) переопределяется аэрозольная оптическая толщина как

$$\tau_a(j+1) = \tau_a(j) + \frac{\delta\rho_{\lambda}}{\rho_{\lambda}}$$

Если $\delta\rho_{\lambda}^0 / \rho_{\lambda} < 0.03$, то итерационный процесс прекращается, в противном случае с новым значением $\tau_a(j+1)$ процесс возвращается к началу п.10.

да нет

11. Строится невязка параметров c_1, c_2 в двух последовательных итерациях. Итерацию проводим до тех пор, пока невязка значений этих параметров между последовательными двумя итерациями станет меньше заданного порога.

нет да

12. Завершение программы

априорная информация о состоянии классифицированных типов объектов не является жестким ограничителем. Программная реализация данного алгоритма может применяться с разной подробностью задания априорной информации, а также может реализовать атмосферную

коррекцию для задаваемой атмосферной оптической ситуации без исходных данных о состоянии ПП. Область применимости данной методики шире, чем у предлагаемой в работе [1], и она может быть применена ко всем типам поверхностей, включая и водную поверхность.

- [1] *H.R. Gordon. Appl. Opt., 1978, v. 17, № 112.*
- [2] *И.Н. Минин. Теория переноса излучения в атмосферах планет., М., Наука, 1988.*
- [3] НИР "Комплекс-95-АР", ИКИПР АНАКА, книга 1, "Разработка методов обработки данных с целью идентификации и классификации растительных объектов. Экспериментальная апробация программных средств идентификации почвенных объектов", Баку, 1994.

- [4] *S. Keevallik, A. Heinlo. On the validity of vertically homogeneous atmospheric models for remote sensing. Academy of Sciences of the Estonian SSR, Tartu, 1983.*
- [5] *Г.Ш. Лившиц. Рассеяние света дневным небом, Алма-Ата. Наука, 1965.*
- [6] *Ж. Ленобль. Перенос радиации в рассеивающих и поглощающих атмосферах. Стандартные методы расчета, Ленинград, Гидрометеиздат, 1990.*

A.Ş. Mehdiyev, A.Ə. Mehdiyeva

YER SƏTHİNİN SPEKTRAL PARLAQLIQ ƏMSALLARININ PARAMETRLƏŞMİŞ TƏSVİRİ ƏSASINDA AT-MOSFER TƏSHİHİNİ EDƏN METOD VƏ ALQORİTMİ

Məqalədə atmosfer-yer səthi sisteminin spektral parlaqlıq əmsallarının parametrləşməsi yolu ilə alternativ yaxınlaşmanın əsasında məsafədən ölçülmüş aerokosmik məlumatların atmosfer təşihini etmək üçün metod təqdim edilir. Həm də göstərilən metodun radiasiyon düzəltməsi alqoritmı təklif edilib.

A.Sh. Mekhtiev, A.A. Mekhtieva

THE ATMOSPHERE CORRECTION METHOD AND ALGORITHM OF THE PARAMETER PERFORMANCE FOR SPECTRAL BRIGHTNESS COEFFICIENT OF THE SPREAD SURFACE

For the remotely sensing received aerospace data atmosphere correction method is proposed. This method is based on the alternative approach to parametring of the spectral brightness coefficient for the atmosphere - spread surface system. The algorithm carry out of the radiative correction also is described.