

К.Т. Протасов, Е.С. Артамонов

ВОССТАНОВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ НА УЧАСТКАХ ЗАТЕНЕНИЯ ДЫМКОЙ И ФРАГМЕНТАМИ ОБЛАКОВ

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 19.08.99 г.

Рассматривается двухэтапная процедура коррекции и восстановления изображений подстилающей поверхности Земли, регистрируемых приборами AVHRR спутников NOAA для некоторых ситуаций, наблюдаемых в весенний и осенний периоды. На первом этапе для устранения влияния полупрозрачной облачности используется метод преобразования гистограмм (этап коррекции данных). На втором этапе для устранения экранирующего влияния облаков используется подход, основанный на восстановлении данных с помощью непараметрических регрессионных зависимостей (этап восстановления). Приводятся примеры коррекции и восстановления реальных изображений, регистрируемых прибором AVHRR.

1. Введение

Общезвестны затруднения, возникающие при анализе видеоданных, полученных в ситуации, когда отдельные участки поверхности Земли закрыты полупрозрачной дымкой или фрагментами облаков. Возникает задача восстановления участков видеоданных, подверженных атмосферным искажениям. Анализ изображений подстилающей поверхности Земли (ППЗ), зафиксированных пятиканальным прибором AVHRR спутника NOAA, показывает, что зачастую лишь отдельные участки анализируемой сцены закрыты полупрозрачными аэрозольными образованиями, через которые просматриваются очертания рельефа. В то же время в тепловых диапазонах, регистрируемых каналами 3, 4, 5, эти образования проявляют себя как экраны. Все многообразие других ситуаций, связанных с искажающим влиянием облачных образований, в данном случае не рассматривается. Если изображение является неискаженным по основному полю видеоданных, то коррекция полупрозрачной дымки на отдельных участках достаточно малой площади может быть осуществлена на основании подхода, связанного с преобразованием гистограмм яркостей. В этом случае предполагается, что нам известна эталонная гистограмма распределения яркостей участка изображения, наблюдаемого при «хороших» условиях видения. Затем этот участок видеоданных фиксируется в условиях влияния дымки. Это приводит к сжатию динамического диапазона наблюдений и искажению формы гистограммы. Задача заключается в пересчете радиояркости замутненного изображения таким образом, чтобы скорректированное изображение имело гистограмму, подобную эталонной гистограмме.

Другой подход восстановления локальных участков многоканальных видеоданных основан на прогнозирующих свойствах регрессионных зависимостей, описывающих взаимосвязи физических полей радиояркостей. В этом случае нелинейное уравнение регрессии предварительно восстанавливается на комплектах участках видеоданных, где искажения отсутствуют, а затем используется для восстановления утраченных экранированием участков изображения. При этом необходимо обеспечить условия текстурной (статистической) однородности участков видеоданных, выбранных для обучения (восстановления регрес-

сионной зависимости), и восстанавливаемого участка, подверженного искажениям или затенениям. Исследование физических моделей формирования теплового излучения и отражения дневного света в тепловом и видимом диапазонах приводит к выводу о том, что существуют корреляционные связи между их радиояркостью. Причем учет случайных факторов, связанных с изменением угла наклона элементов поверхности, обуславливает положительную корреляцию, а интегральный коэффициент отражения солнечной радиации приводит к отрицательной корреляционной связи между яркостью в тепловом и видимом диапазонах. В литературе [1] проведен анализ корреляции яркости в видимом и инфракрасном диапазонах на моделях и реальных объектах подстилающей поверхности Земли. Замечено, что тип (положительная, отрицательная) и величина корреляционных связей зависят от текстуры и свойств отражающей поверхности. В связи с этим естественно воспользоваться нелинейным регрессионным уравнением для восстановления дефектных компонент одного из полей по наблюдениям другого поля.

2. Коррекция полупрозрачных замутнений фрагментов изображений методом преобразования гистограмм

Рассмотрим подход, основанный на методе преобразования гистограмм. Этот подход уместно использовать в тех случаях, когда наблюдаемое изображение подвержено искажающему влиянию полупрозрачного аэрозольного образования, кроме того, известна гистограмма распределения яркостей этого участка видеоданных, полученная в условиях хорошей видимости. Последнюю можно заменить гистограммой соседнего участка изображения, если он текстурно эквивалентен восстанавливаемому участку и не подвержен замутнению на данном снимке. Заметим, что гистограмма изображения как усредненная статистическая характеристика более стабильна по сравнению с конкретной реализацией наблюдений.

С учетом разрешения прибора AVHRR, когда участок ППЗ 1×1 км отображается в пиксель видеоданных, модель влияния замутнения на призмное изображение в математической форме имеет вид оператора свертки. Функция рассеяния точки для полупрозрачных аэрозолей, приле-

гающих к отражающей поверхности, имеет дельта-составляющую и протяженный спектр и нам неизвестна. Попытаемся описать эту ситуацию с помощью гистограмм. Будем полагать, что идеальные условия наблюдения некоторого участка поверхности Земли формируют распределение радиояркостей, описываемое гистограммой $\hat{g}(y)$, а влияние полупрозрачного тумана приводит к искажению гистограммы $\hat{g}(y)$, так что мы наблюдаем распределение яркости $\hat{f}(x)$, выраженной в уменьшении динамического диапазона и смещении области определения видеоданных.

Вначале для простоты изложения будем полагать x и y непрерывными величинами, $x, y \in [0,1]$. Распределение радиояркостей замутненного изображения будем описывать функцией плотности распределения вероятностей $f(x)$, а распределение радиояркостей идеального (эталонного) изображения – распределением $g(x)$. Для восстановления изображения воспользуемся преобразованиями яркостей:

$$y = T(x), \quad x, y \in [0,1], \quad (1)$$

где x – значения яркости замутненного изображения, а y – чистого изображения.

Будем рассматривать класс восстанавливающих преобразований $T(\cdot)$ однозначных и строго монотонных на $[0,1]$, так что и обратное преобразование $T^{-1}(\cdot)$ также будет строго монотонным на $[0,1]$. Условие монотонности сохраняет порядок перехода от черного к белому в шкале яркости восстанавливаемого изображения.

Учитывая тот факт, что величины x и y связаны функционально, их вероятностные распределения выражаются следующим образом [2]:

$$g(x) = f(x) \left| \frac{dx}{dy} \right|_{x=T^{-1}(y)}, \quad (2)$$

где $T^{-1}(y)$ – обратное преобразование.

Для нахождения преобразования $y = T(x)$ рассмотрим следующую двухэтапную процедуру идентификации $y = T(x)$ [2, 3]. Воспользуемся свойством интегральной функции распределения, интерпретируемой как преобразование, выравнивать частоты, а именно

$$t = F(x) = \int_0^x f(s) ds, \quad (3)$$

где $F(x)$ – интегральная функция распределения, t распределена равномерно на интервале $[0,1]$. С другой стороны, по аналогии с (3) имеем

$$t = G(y) = \int_0^y g(s) ds,$$

где $G(y)$ – интегральная функция распределения. Приравняв выражения $G(y) = F(x)$, получим

$$y = T(x) = G^{-1}[F(x)], \quad (4)$$

где $G^{-1}(y)$ – обратное преобразование.

Таким образом, переходя на первом этапе к равномерному распределению яркостей по формуле (3), а на втором этапе – обращая преобразование $G(\cdot)$, получим искомого распределение яркостей и выражение для корректирующего преобразования $y = T(x)$.

Далее рассмотрим дискретный вариант преобразования (4). Пусть $X = \{X_i\}_{i=1}^n$ – фрагмент оцифрованного изображения (необязательно прямоугольный) и n – количество пикселей этого фрагмента. Предположим, что этот фрагмент подвержен искажающему влиянию атмосферы, а $Y = \{Y_i\}_{i=1}^n$ – фрагмент оцифрованных данных, снятый в «хороших» условиях видения. Этот фрагмент позволяет восстановить гистограмму $\hat{g}(y)$.

Когда уровни яркости принимают дискретные значения, выражение (3) имеет табличный вид [3]:

$$t_k = \hat{F}(x_k) = \sum_{j=0}^k \hat{f}(x_j) = \sum_{j=0}^k \frac{n_j}{n}, \quad 0 \leq x_j \leq 1, k = 0, \dots, L-1, \quad (5)$$

где L – число дискретных уровней яркости; n_j – количество элементов из общего числа n , имеющих уровень j в дискретном изображении.

Соответственно дискретная форма выражения (4) имеет следующий вид:

$$t_k = \hat{G}(y_k) = \sum_{j=0}^k \hat{g}(y_j) = \sum_{j=0}^k \frac{n_j}{n}, \quad 0 \leq y_j \leq 1, k = 0, \dots, L-1, \quad (6)$$

поэтому обращение такой функции достигается перестановкой входа и выхода и вместе с (5) может быть использовано для коррекции радиояркостей методом преобразования гистограмм.

3. Восстановление изображений на основе регрессионных уравнений прогнозирования случайных полей радиояркостей

Рассмотрим подход восстановления видеоданных, основанный на использовании регрессионной зависимости. Для построения уравнения регрессии необходимо иметь чистый (неискаженный) фрагмент изображения, который поточечно согласован с восстанавливаемым участком видеоданных. Кроме того, для адаптации уравнения к конкретным видеоданным необходим участок неискаженных видеоданных по двум каналам одновременно (назовем такой фрагмент обучающим).

Восстанавливаемые значения прогнозируемого поля будем описывать случайной величиной $Y \in R^1$, а радиояркости полей, являющихся источниками прогнозирующей информации, – случайным вектором $\mathbf{X} \in R^k$, где R^k – k -мерное евклидово пространство; $\mathbf{X} = (X^1, \dots, X^k)^T$, X^i – радиояркости i -го канала прибора AVHRR, $i = 1, \dots, k = 5$, T – знак транспонирования.

Взаимосвязь прогнозируемой переменной Y и вектора \mathbf{X} будем описывать функционалом регрессии

$$m(\mathbf{x}) = E(Y/\mathbf{X} = \mathbf{x}), \quad (7)$$

где $E(\cdot)$ – оператор математического ожидания, причем $E(|Y|) < \infty$.

Если существуют нижеследующие плотности вероятностей случайных величин \mathbf{X} и Y , то с учетом (7) имеем

$$y = m(\mathbf{x}) = \int_{R^1} y \frac{f(\mathbf{x}, y)}{f(\mathbf{x})f(y)} dF(y), \quad (8)$$

где $\mathbf{x} \in R^k, y \in R^1, f(\mathbf{x}, y)$ – совместная плотность вероятностей случайных вектора \mathbf{X} и величины Y ; $f(\mathbf{x})$ – плотность вероятности случайного вектора \mathbf{X} ; $f(y)$ – плотность вероятности случайной величины Y , а $F(y)$ – функция распределения Y .

Если в нашем распоряжении имеется выборка попарно независимых одинаково распределенных случайных величин $\{(\mathbf{X}_i, Y_i)\}_{i=1}^n$, где n – количество контрольных отсчетов на тестовом участке, то для вычисления выражения (7) естественно воспользоваться непараметрическими оценками неизвестных распределений по выборочным данным [4]. Заменяем неизвестные распределения их непараметрическими оценками ядерного типа, а $F(y)$ заменим эмпирической функцией $F_n(y)$, тогда оценка уравнения регрессии (8) примет вид

$$\hat{m}_h(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{j=1}^n Y_j \prod_{i=1}^k K_h(x_i - X_j^i)}{\sum_{j=1}^n \prod_{i=1}^k K_h(x_i - X_j^i)}, \quad (9)$$

где h – ширина окна (параметр сглаживания или масштаба), описываемого функцией $K_h(u) = h^{-1} K(u/h)$. В качестве $K(\cdot)$ может быть взято ядро Епанечникова следующего вида: $K_h(u) = 0,75 (1 - u^2) I(|u| \leq 1)$, где $I(\cdot)$ – индикаторная функция, или гауссово ядро [4].

Накопленный практический опыт использования подобных оценок показывает, что точностные характеристики уравнения регрессии $\hat{m}_h(\mathbf{x})$ в большей степени определяются не формой ядра, а параметром масштаба h . В связи с этим возникает проблема оценивания h с учетом конкретной выборки наблюдений $\{(\mathbf{X}_i, Y_i)\}_{i=1}^n$.

Воспользуемся для оценивания h методом скользящего контроля, заключающимся в том, что строится модифицированная оценка регрессии $\hat{m}_{h,j}(\mathbf{X}_j)$, в которой последовательно пропускается j -е наблюдение $(\mathbf{X}_j, Y_j), j = 1, \dots, n$. Это наблюдение Y_j в точке \mathbf{X}_j должно быть восстановлено по всем другим наблюдениям $\{(\mathbf{X}_i, Y_i)\}_{i \neq j}$, входящим в уравнение (9), наилучшим образом. Критерий качества оценивания h зависит от способности предсказывать набор значений $\{Y_j\}_{j=1}^n$ по наборам подвыборок $\{(\mathbf{X}_i, Y_i)\}_{i \neq j}$:

$$J(h) = n^{-1} \sum_{j=1}^n [Y_j - \hat{m}_{h,j}(\mathbf{X}_j)]^2 w(\mathbf{X}_j), \quad (10)$$

где $w(\cdot)$ – весовая функция, которую, в простейших случаях, можно и не использовать (положить равной единице). Задача оптимизации (10) по параметру h решается численно поисковым методом адаптации [5].

После того как параметр h в выражении (9) для $\hat{m}_h(\mathbf{x})$ конкретизирован, уравнение регрессии можно использовать для восстановления значений Y по наблюдаемым \mathbf{X} и для фрагмента видеоданных, закрытых облаками. Следует заметить, что регрессионная модель прогнозирования ненаблюдаемых значений будет работать лишь при соблюдении статистической однородности данных, по которым производилось восстановление зависимости и которые восстанавливаются. С этой целью необходим предвари-

тельный анализ «полного» изображения алгоритмом сегментации, позволяющий выделить статистически однородные участки. Затем на каждом из этих участков необходимо по выборочным данным восстановить локальное выражение (9) со своими значениями h .

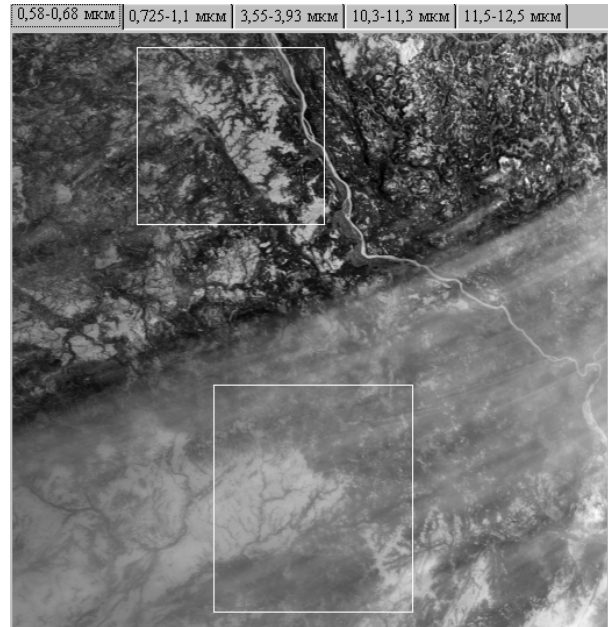


Рис. 1а. Изображение 1-го канала с примером полупрозрачного затемнения части снимка и выбором эталонного (вверху) и восстанавливаемого (внизу) фрагментов

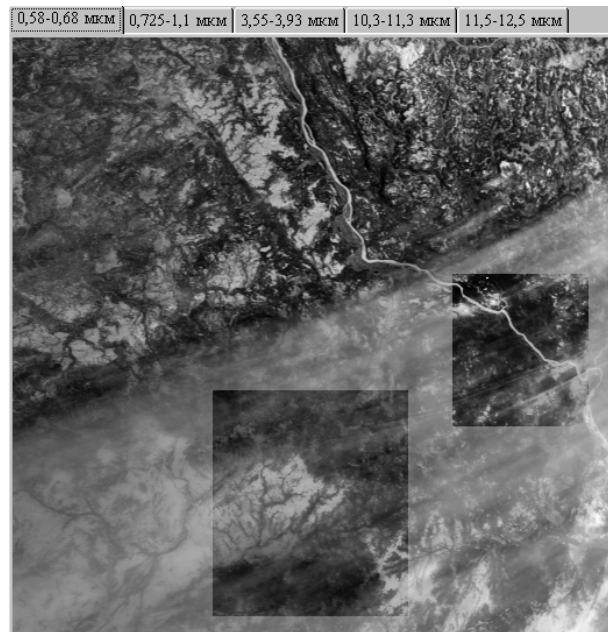


Рис. 1б. Пример скорректированных фрагментов 1-го и 2-го каналов изображения методом преобразования гистограмм

4. Коррекция и восстановление изображений ПЗ, регистрируемых прибором AVHRR

Проблема атмосферной коррекции в общей постановке достаточно сложна, и рассматриваемые подходы ориентированы на некоторые частные ситуации атмосферных

искажений, имеющих место на практике. Так, при съемке ППЗ в осенний и весенний периоды мы зачастую наблюдаем следующую картину. В 1-м и 2-м каналах наблюдений отмечаем полупрозрачное замутнение некоторых участков видеоданных. В то же время в 3, 4 и 5-м каналах видим полное экранирование этих фрагментов изображения тепловыми аномалиями. Вместе с тем на изображениях существуют участки с подобной текстурой и отсутствием замутнения. Этот принцип подобия является предпосылкой для использования развиваемых подходов. На первом этапе восстановления таких изображений проводим коррекцию полупрозрачных участков методом преобразования гистограмм. С этой целью подбираем два текстурно-однородных фрагмента изображения, выделенных на рис. 1а, один из которых «чистый», а другой замутнен и подлежит коррекции. Оцениваем гистограммы с обоих участков (рис. 2, а, б) и формируем зависимость (4), на основании которой корректируем замутненный фрагмент. Результат коррекции приведен на рис. 1б. Качество полученного изображения можно оценить по степени адекватности эталонной гистограммы и гистограммы скорректированного изображения (рис. 2, а, в). Следует учитывать линейчатый характер последней из гистограмм, связанный с дискретностью по яркости преобразуемого изображения, в то время как теоретические основы подхода корректны в непрерывной интерпретации. Этот эффект проявляется в том, что интегральный критерий качества дает несколько завышенное значение ввиду отсутствия некоторых значений яркости скорректированного изображения.

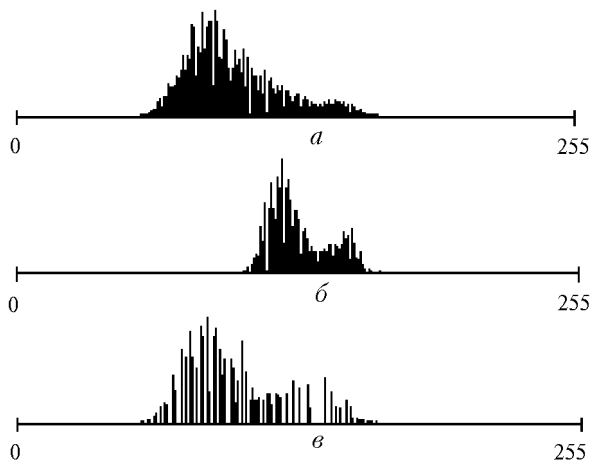


Рис. 2. Гистограммы фрагментов изображения, приведенного на рис. 1а: а – эталонного участка; б – полупрозрачного замутненного фрагмента; в – восстановленного фрагмента

Далее были исследованы стохастические зависимости радиояркости каналов прибора AVHRR, восстановленные с использованием непараметрических уравнений нелинейной регрессии. С этой целью был выбран участок изображения 512×512 отсчетов пяти каналов (рис. 3), восстановлены уравнения регрессии на обучающем фрагменте и решалась задача восстановления данных 2, 3, 4, 5-го каналов по наблюдениям 1-го канала на контрольном фрагменте (рис. 3 и 4). Уравнения регрессии восстанавливались на обучающем фрагменте методом скользящего контроля, при этом значение функционала скользящего контроля (10) составило 3,4%. Затем восстановленные регрессионные зависимости использовались на другом текстурно подобном фрагменте, причем свойство подобия определялось приближенно опера-

тором (для этих целей можно использовать процедуру кластерного анализа и выбирать зоны подобия автоматически). Качество прогнозирования спектральных каналов на другом фрагменте, отличном от обучающего, составило также 3,4%.

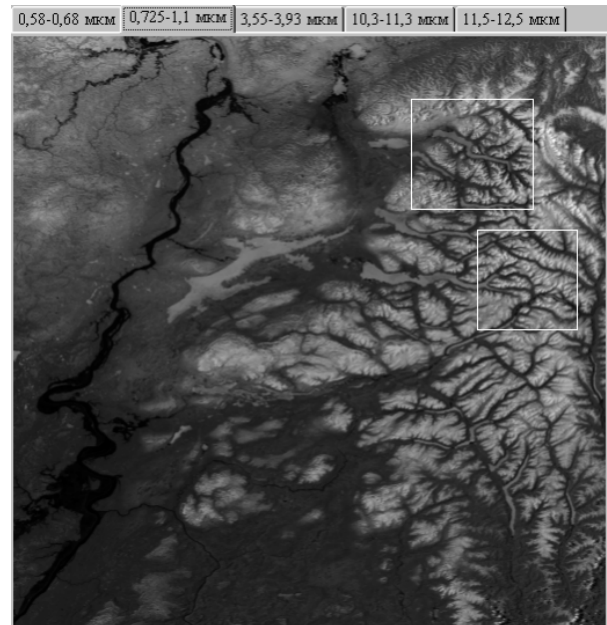


Рис. 3. Чистое весеннее изображение 2-го канала «плато Путорана» с выделенным фрагментом для «обучения» восстанавливаемой регрессии (вверху) и контрольным фрагментом

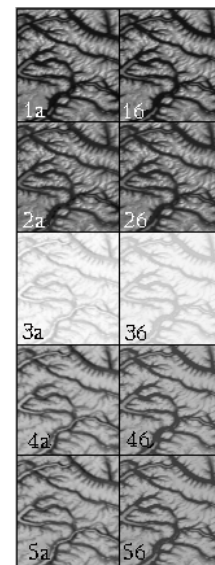


Рис. 4. Исходные (а) и восстановленные (б) фрагменты изображения (приведенного на рис. 3) по пяти каналам соответственно

На рис. 5а, 5б, 5в показан весь цикл двухэтапной процедуры коррекции и восстановления: на рис. 5а – фрагмент гистограммной коррекции полупрозрачного замутнения в 1-м (2-м) канале, на рис. 5б – экранирующее тепловое облако в 4-м (и 5-м) канале, которое в 1-м канале было полупрозрачным. Наконец, на рис. 5в приведен результат восстановления изображения 4-го канала с помощью уравнения непараметрической регрессии.



Рис. 5а. Коррекция полупрозрачного замутнения в центре снимка методом преобразования гистограмм (канал 1 и 2)

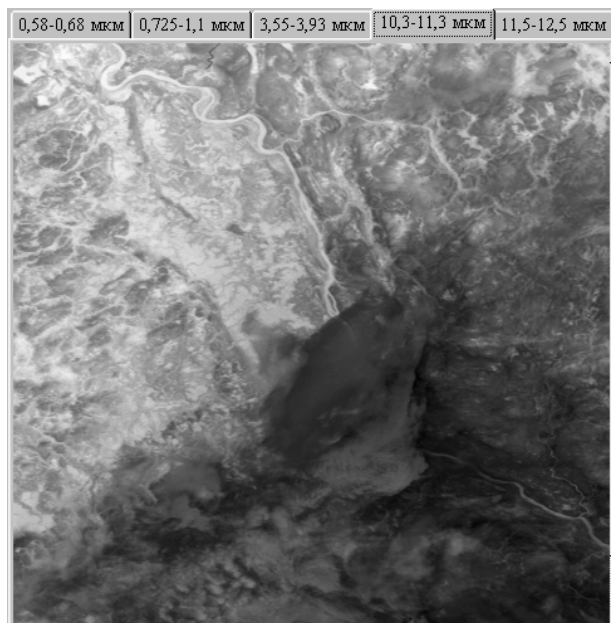


Рис. 5б. Пример экранирования подстилающей поверхности Земли тепловой аномалией в 4-м и 5-м каналах



Рис. 5в. Пример восстановления экранированного участка изображения в 4-м и 5-м каналах методом регрессионного прогнозирования

5. Заключение

Высокое качество восстановления изображений с помощью регрессионной зависимости нами наблюдалось лишь на осенних и весенних снимках AVHRR. На летних снимках качество восстановления 2-го канала по данным 1-го было неудовлетворительным. Но на летних снимках нам и не удалось наблюдать описанный эффект полупрозрачного замутнения (в 1-м – 2-м каналах) и экранирования (в 3-м – 5-м каналах), которые в данном случае корректировались и восстанавливались.

1. Павлов Н.И., Шуба Ю.А., Шеволдин В.А. Взаимная связь яркости объектов в инфракрасном и видимом диапазонах при естественном теплообмене // Оптический журнал. 1998. Т. 65. № 12. С. 35–38.
2. Пугачев В.С. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Наука, 1979. 496 с.
3. Вудс Р.Э., Гонсалес Р.С. Цифровые методы улучшения изображений в реальном времени // ТИИЭР. 1981. Т. 69. № 5. С. 176–190.
4. Хардле В. Прикладная непараметрическая регрессия / Пер. с англ. М.: Мир, 1993. 349 с.
5. Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М.: Наука, 1968. 400 с.

K.T. Protasov, E.S. Artamonov. Reconstruction of Space Images of the Earth Underlying Surface Shadowed by Haze and Cloud Fragments.

Two-step procedure of correction and reconstruction of the images of the earth underlying surface recorded with AVHRR device from the NOAA satellites in some situations observed in spring and autumn is presented. The method of histogram transform is used to eliminate the effect of semi-transparent cloud cover (the step of data correction). In order to eliminate screening by the clouds, an approach based on data reconstruction with a help of nonparametrical regression is used at the second step. Examples of the correction and reconstruction of some actual images recorded by the AVHRR device are presented.