

Национальный исследовательский
Томский государственный университет
Механико-математический факультет
Кафедра физической и вычислительной механики



Материалы

XXI Всероссийской
научной конференции с
международным участием

"Сопряженные задачи
механики реагирующих
сред, информатики и
экологии"

17 – 19 сентября 2018г.
г. Томск

ВОССТАНОВЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО СПУТНИКОВЫМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ ПРИБОРАМ MODIS

М. В. Тарасенков^{1,2}, В. В. Белов¹, М. В. Энгель¹

¹ФГБУН Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, площадь Академика Зуева, 1

²ФГАОУВО Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36
E-mail: TMV@iao.ru

Для восстановления коэффициентов отражения земной поверхности из спутниковых измерений необходимо, как правило, предварительно выполнить их атмосферную коррекцию. Существует ряд алгоритмов ее проведения (например [1-5]). Однако применение каждого из них связано с определенными ограничениями. В рамках работ [6-7] нами разработан алгоритм атмосферной коррекции, который наиболее полно учитывает факторы, влияющие на формирование принимаемого спутниковой системой излучения.

В отличие от алгоритмов других авторов, в предлагаемом коррекция выполняется одновременно для всего изображения с учетом влияния неоднородности земной поверхности при формировании бокового подсвета и дополнительной освещенности отраженным излучением.

В работе рассматриваются условия сходимости алгоритма, критерии задания радиусов области формирования бокового подсвета и дополнительной освещенности поверхности, обусловленных рассеянием излучения, отраженного земной поверхностью. С помощью разработанного алгоритма выполняется атмосферная коррекция для трех тестовых участков на земной поверхности: в Иркутской, Московской и Томской областях. Для этих участков оценивается качество атмосферной коррекции предложенным алгоритмом, алгоритмом MOD09 NASA и алгоритмом восстановления коэффициентов отражения без атмосферной коррекции.

В предлагаемом алгоритме решение обратной задачи восстановления коэффициентов отражения из спутниковых измерений интенсивностей световых потоков выполняется в два этапа [6-7]:

1) Решается система линейных уравнений для определения $Q = r_{surf} E_{sum}$:

$$\begin{cases} I_{sum,1} = I_{sun,1} + \sum_{j=1}^N A_{1j} Q_j + A_{out,1} \bar{Q}_1 \\ \dots \\ I_{sum,N} = I_{sun,N} + \sum_{j=1}^N A_{Nj} Q_j + A_{out,N} \bar{Q}_N \end{cases} \quad (1)$$

где $I_{sum,i}$ – интенсивность принимаемого от i -го пикселя излучения, $I_{sun,i}$ – интенсивность принимаемого излучения, не взаимодействовавшего с земной поверхностью, A_{ij} – интенсивность отраженного излучения от j -го пикселя при наблюдении i -го пикселя при условии единичной светимости земной поверхности, $A_{out,i} \bar{Q}_i$ – оценка интенсивности излучения от участков земной поверхности вне области восстановления.

2) Решается нелинейная система уравнений для определения r_{surf} :

$$\begin{cases} \frac{Q_1}{E_0} = r_{surf,1} \left(1 + \sum_{j=1}^N C_{1,j} r_{surf,j} + C_{out,1} \bar{r}_{surf,1} \right) \\ \dots \\ \frac{Q_N}{E_0} = r_{surf,N} \left(1 + \sum_{j=1}^N C_{N,j} r_{surf,j} + C_{out,N} \bar{r}_{surf,N} \right) \end{cases} \quad (2)$$

где E_0 – освещенность земной поверхности без учета дополнительной освещенности отраженным излучением; C_{ij} – дополнительная освещенность i -го пикселя однократно отраженным излучением от j -го пикселя при единичной светимости земной поверхности, $C_{out,i} \bar{r}_{surf,i}$ – оценка дополнительной освещенности из областей вне области восстановления.

В выполненных ранее тестовых расчетах [6] коррекция успешно выполнялась для тестового примера при оптических толщинах атмосферы вплоть до 8. Каковы условия сходимости систем уравнений (1)-(2) при любых значениях r_{surf} ? В [8] приводится теорема, в которой сформулированы условия сходимости метода простых итераций. Исходя из этих условий система (1) сходится, если выполнено условие:

$$\max_i \left(\frac{\sum_{j=1}^N A_{ij} - A_{ii}}{A_{ii}} \right) < 1 \quad (3)$$

В свою очередь система (2) сходится к решению, если выполнено условие:

$$\frac{\gamma_1}{1-\gamma_1} < 1 \quad (4)$$

Используя модели LOWTRAN-7 [9], для 1,2,3,4,5 и 8 каналов прибора MODIS для заданных зенитных углов ориентации приемника осуществлены оценки оптических толщин атмосферы, при которых условия сходимости метода простых итераций выполняются. Оценки показывают, что условие (3) выполняется при произвольном размере пикселя r при $\tau_i < 1$, но если размер пикселя $r \geq 1$ км, то оно выполняется при $\tau_i < 2-3$. Условие (4) выполняется при любом τ_i из рассмотренных (вплоть до 8).

Сколько членов достаточно взять в суммах, входящих в системы (1)-(2)? Можно доказать, что если установить требование на погрешность результата системы (1):

$$\min_i \frac{Q_i}{\bar{Q}_i} \geq \delta_1 \quad (5)$$

где \bar{Q}_i – приближенное значение светимости при удалении из расчета излучения вне радиуса бокового подсвета, δ_1 – требование на погрешность восстановления, то радиус бокового подсвета R достаточно выбрать удовлетворяющим критерию:

$$k_1(R) \equiv \frac{\iint_{S(R)} h(\theta_{d,i,x,y}) dx dy}{\iint_S h(\theta_{d,i,x,y}) dx dy} \geq \delta_1 +$$

$$+(\delta_1 - 1) \frac{\frac{1}{\pi} \exp(-\tau_i)}{\iint_S h(\theta_{d,i,x,y}) dx dy} \quad (6)$$

где h – функция размытия точки канала формирования бокового подсвета, $\theta_{d,i}$ – зенитный угол ориентации оптической оси приемника, соответствующий i -й изопланарной зоне, $S(R)$ – поверхность Земли в пределах радиуса бокового подсвета, S – вся поверхность Земли.

Установим требования на погрешность результата системы (2) в виде:

$$1 \geq \min_i \frac{\tilde{r}_{surf,i}}{\tilde{r}_{surf,i}} \geq \delta_2 \quad (7)$$

где $\tilde{r}_{surf,i}$ – приближенное значение коэффициента отражения при удалении из расчета освещенности вне радиуса области формирования переотраженного излучения, δ_2 – требование на погрешность восстановления.

Тогда радиус области формирования дополнительной освещенности достаточно выбрать из условия:

$$\frac{\tilde{\gamma}_1(R_1)}{\gamma_1} \geq \frac{\delta_2}{\gamma_1} ((\delta_2 - 1) + \delta_2 \gamma_1) \quad (8)$$

где R_1 – радиус области формирования дополнительной освещенности однократно отраженным излучением, $\tilde{\gamma}_1(R_1)$ – вклад однократно отраженного излучения от области радиуса R_1 в освещенность земной поверхности.

Для оптических моделей атмосферы LOWTRAN-7 были выполнены оценки этих радиусов, исходя из (6) и (8) для $\delta_1 = \delta_2 = 0.95$. Расчеты показывают, что радиус области бокового подсвета достаточно взять равным от 4 до 10 км в зависимости от зенитного угла приемника для 1-го канала, для 2 канала – от 3 до 5 км, для 3 – от 10 до 30 км, для 4 – от 5 до 20 км, для 5 – от 2 до 5 км и для 8 канала от 15 до 40 км. Радиус области формирования дополнительной освещенности достаточно взять равным 4 км для 1 канала, 2 км для 2 канала, 15 км для 3 канала, 5 км для 4 канала, 1 км для 5 канала и 15 км для 8 канала. Как видно из этих результатов, полученные радиусы больше размера отдельного пикселя, поэтому использование уравнений (1)-(2) обоснованно.

Для проверки возможностей предлагаемого алгоритма были выполнены сравнения погрешностей значений восстановленных коэффициентов отражения для трех тестовых участков:

1) участок Томской области с координатами $55.95-56.85^0$ с.ш. и $84.05-84.95^0$ в.д. (даты измерений 17.06.2012-23.06.2012 г.).

2) участок Иркутской области $51.42^0-52.67^0$ с.ш. и $103.64^0-105.47^0$ в.д. (даты измерений 20.06.2017-21.06.2017 г.).

3) участок вблизи г. Москва $55.72^0-55.95^0$ с.ш. и $37.56^0-38.10^0$ в.д. (даты измерений 06.05.2017-07.05.2017 г.).

Восстановление коэффициентов отражения выполнялось предлагаемым алгоритмом, алгоритмом MOD09 NASA и алгоритмом без атмосферной коррекции. В пределах каждой из

тестовых областей были выбраны по 1 точке с координатами:

1) 56.20^0 с.ш. и 84.30^0 в.д. (Тимирязевский лесхоз, Томская область).

2) 52.52^0 с.ш. 105.06^0 в.д. (заказник Красный Яр, Иркутская область).

3) 58.85^0 с.ш., 37.83^0 в.д. (национальный парк Лосинный остров, г. Москва).

В тестовых участках располагаются протяженные лесные территории, покрытые преимущественно сосной. Из работы [10] были взяты полевые измерения коэффициентов отражения для молодой хвой зрелой сосны в летний период для длин волн наиболее близких к центрам каналов прибора MODIS. Для указанных точек выполнялось сравнение коэффициентов отражения, полученных предлагаемым алгоритмом, алгоритмом MOD09 и без коррекции. Значения средних отличий для 6 каналов MODIS приведены на рисунках 1-3.

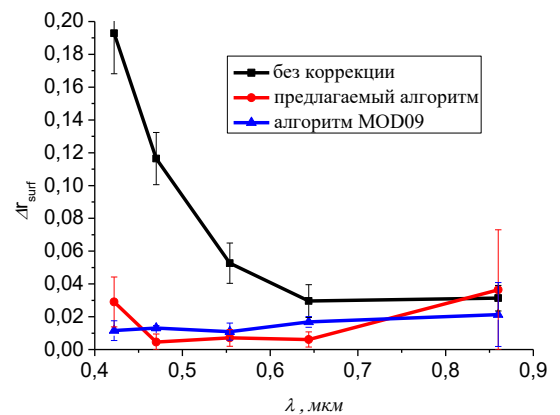


Рис. 1. Оценка средней погрешности восстановления коэффициентов отражения по снимкам с датами с 17.06.2012 по 23.06.2012 г. для точки с координатами 56.20^0 с.ш. и 84.30^0 в.д. (Тимирязевский лесхоз)

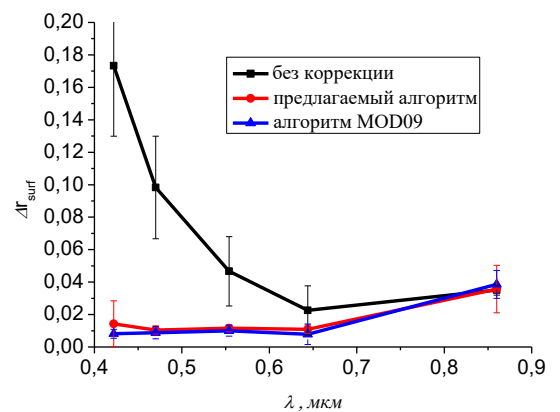


Рис. 2. Оценка средней погрешности восстановления коэффициентов отражения по снимкам с датами с 20.06.2017 по 21.06.2017 г. для точки с координатами 52.52^0 с.ш. 105.06^0 в.д. (заказник Красный Яр)

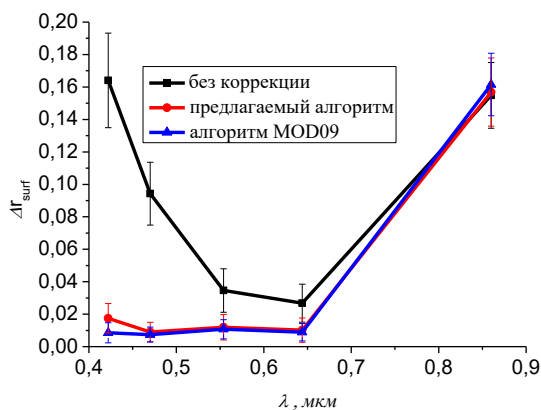


Рис. 3. Оценка средней погрешности восстановления коэффициентов отражения по снимкам с датами с 20.06.2017 по 21.06.2017 г. для точки с координатами 58.85° с.ш., 37.83° в.д. (национальный парк Лосиный остров)

Значения, приведенные на рисунках 1-3, являются оценкой качества выполненной атмосферной коррекции.

Сравнение показывает, что алгоритмы коррекции значительно улучшают качество спутниковой информации по сравнению с результатами без коррекции. Погрешность двух алгоритмов примерно одного порядка, за исключением 8 канала MODIS, где предлагаемый алгоритм несколько проигрывает. Причина этого, как показывают оценки [11], состоит в том, что в алгоритме коррекции для данного канала необходимо учитывать поляризацию излучения. Для 1, 3 и 4 каналов предлагаемый алгоритм имеет в среднем меньшую погрешность, чем алгоритм MOD09.

Литература

- 1 Лысенко С.А. Атмосферная коррекция многоспектральных спутниковых снимков на основе аппроксимационной модели переноса солнечного излучения // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 09. С. 775–788.
- 2 Катковский Л.В. Параметризация уходящего излучения для быстрой атмосферной коррекции гиперспектральных изображений // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 09. С. 778–784.
- 3 Lyapustin A., Martonchik J., Wang Y. et al. Multi-angle implementation of atmospheric correction (MAIAC): Part 1. Radiative transfer basis and look-up tables // Journal of Geophysical Research. 2011. No.116. P. D03210.
- 4 Vermote E.F., Saleous N.El., Justice C.O. et al. Atmospheric correction of visible to middle-infrared EOS-MODIS data over land surfaces: Background, operational algorithm and validation // Journal of geophysical research. 1997. V. 102. No. D14. P. 17,131-17,141.
- 5 Tanre D., Holben B.N., Kaufman Y.J. Atmospheric correction algorithm for NOAA-AVHRR products: theory and application // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1992. V.30. No. 2. P. 231 – 248.
- 6 Белов В.В., Тарасенков М.В. О точности и быстродействии RTM-алгоритмов атмосферной коррекции спутниковых изображений в видимом и УФ-диапазонах // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 07. С. 564-571.
- 7 Тарасенков М.В., Белов В.В. Комплекс программ восстановления отражательных свойств земной поверхности в видимом и УФ-диапазонах // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 07. С. 622-627.
- 8 Березин И.С., Жидков Н.П. Методы вычислений. М.: гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1959. 620 с.
- 9 Kneizys, F.X., Shettle E.P., Anderson G.P. et al. User Guide to LOWTRAN-7. ARGL-TR-86-0177. ERP 1010. Hansom AFB. MA 01731, 1988. 137 p.
- 10 Кринов Е.Л. Спектральная отражательная способность природных образований М: изд-во АН СССР, 1947. 123 с.
- 11 Зимовая А.В., Тарасенков М.В., Белов В.В. Влияние поляризации излучения на восстановление коэффициента отражения земной поверхности по спутниковым данным в видимом диапазоне длин волн // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 11. С. 927–932.