

**С.В. Афонин, В.В. Белов, Б.Д. Белан, М.В. Панченко, С.М. Сакерин,
Д.М. Кабанов**

Сравнение спутниковых (AVHRR/NOAA) и наземных измерений характеристик атмосферного аэрозоля

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 16.09.2002 г.

Представлены результаты сравнительного анализа спутниковых данных и наземных измерений аэрозольных характеристик на территории Томской области. Цель анализа – оценка применимости данных спутниковой системы AVHRR/NOAA для определения свойств атмосферного аэрозоля и дымов лесных пожаров. Результаты работы демонстрируют хорошие потенциальные возможности использования данных AVHRR/NOAA для оперативного космомониторинга свойств атмосферного аэрозоля и оценки оптического состояния атмосферы в регионах Западной Сибири.

Введение

В последнее десятилетие заметно активизировались усилия по планированию и осуществлению широкомасштабных натуральных экспериментов в области физики и химии атмосферы. Одной из главных целей этих исследований является сбор более полной информации о глобальных и региональных закономерностях пространственно-временной изменчивости содержания и свойств тропосферного аэрозоля и в том числе аэрозоля антропогенного происхождения, источником которого являются лесные пожары. Исследование свойств аэрозоля и его влияния на радиационный режим в атмосфере является перспективным направлением входящего в состав Международной геосферно-биосферной программы (IGBP, <http://www.igbp.kva.se>) ключевого проекта International Global Atmospheric Chemistry (IGAC, <http://www.igac.unh.edu>). В проекте отмечается необходимость комбинированного использования спутниковых, самолетных и наземных измерений аэрозольных характеристик атмосферы для достижения целей проекта.

По оценкам специалистов лесные пожары ежегодно охватывают площадь в среднем около 8–10 млн га, а ежегодное поступление аэрозоля в атмосферу, вызванное лесными пожарами, составляет примерно 130 млн т [1]. При учете влияния аэрозолей на главные биохимические циклы (в частности, на глобальный углеродный бюджет) задача мониторинга лесных пожаров и изучения воздействия лесных пожаров на состав и оптические свойства атмосферы принимает важное самостоятельное значение, комплексное решение которой требует применения дистанционных методов исследования с использованием

спутниковых данных. Решение этой задачи является одной из стратегических целей новой Международной программы «Global Observation for Forest and Land Cover Dynamics» (GOF-C-GOLD, <http://www.fao.org/gtos/gofc-gold>).

К настоящему времени в мире накоплен опыт использования спутниковых систем для мониторинга атмосферного аэрозоля и дымов лесных пожаров (см., например, [2–6]). К сожалению, в России, где ежегодно возникает большое количество крупных лесных пожаров, широкомасштабный оперативный космомониторинг оптического состояния атмосферы практически не осуществляется. Это обстоятельство требует дальнейшей активизации работ в данном направлении.

Основные цели работы

В Институте оптики атмосферы (ИОА) СО РАН накоплен многолетний опыт проведения теоретических и экспериментальных (наземных и самолетных) исследований свойств атмосферного аэрозоля, результаты которых широко представлены в российской и зарубежной научной печати. Имеются обширные массивы экспериментальных данных об аэрозольных и метеорологических характеристиках атмосферы, которые можно использовать в качестве тестовых для валидации и дальнейшего развития методов космомониторинга атмосферного аэрозоля. Описание результатов исследований, баз данных и литературные ссылки можно найти в Интернете на сайте Института (<http://www.iao.ru>). Начиная с весны 1998 г., в ИОА на основе станции приема цифровой спутниковой информации «СканЭкс» осуществляется регулярный мониторинг Томского региона в пяти спектральных

каналах ($\lambda = 0,63; 0,84; 1,6; 3,75; 10,8; 12,0$ мкм) с помощью спутниковой системы AVHRR/NOAA (Advanced Very High Resolution Radiometer, National Oceanic and Atmospheric Administration USA). Эти обстоятельства открывают уникальные возможности дополнительных исследований свойств атмосферного аэрозоля (и в том числе дымов лесных пожаров) для региона Западной Сибири на основе комплексного анализа данных регулярных наземных измерений аэрозольных характеристик атмосферы и цифровой спутниковой информации в видимой и инфракрасной областях спектра.

Цель работы состояла в оценке принципиальных возможностей использования в Томском регионе системы AVHRR/NOAA для получения количественной информации о свойствах атмосферного аэрозоля и дымов лесных пожаров. Для этого за период май – сентябрь 1999 г. проведен сравнительный анализ спутниковых данных (канал 1 AVHRR) и наземных измерений (в Томске и в 70 км от него на берегу р. Оби в районе с. Киреевск) характеристик атмосферного аэрозоля, включающих аэрозольную оптическую толщину (АОТ), счетную концентрацию аэрозольных частиц (см^{-3}), коэффициент рассеяния света на длине волны $\lambda = 0,52$ мкм (км^{-1}), массовое содержание сажи ($\text{мкг}/\text{м}^3$).

Одновременно осуществлялось формирование информационно-методической основы региональной системы оценки оптического состояния атмосферы по спутниковым данным, создаваемой для целей оперативного определения оптических свойств аэрозоля и атмосферной коррекции данных космомониторинга подстилающей поверхности.

Результаты

На начальной стадии решения поставленной в работе задачи с помощью программы LOWTRAN-7 [7] было выполнено численное имитационное моделирование на ЭВМ потоков восходящего излучения для первого ($\lambda = 0,63$ мкм) и второго ($\lambda = 0,84$ мкм) каналов AVHRR/NOAA в широком диапазоне оптических и геометрических условий наблюдений. Одна из основных целей проведения расчетов – формирование информационной базы создаваемой спутниковой системы оперативного космомониторинга характеристик атмосферного аэрозоля и оптического состояния атмосферы. По результатам моделирования исследованы зависимости интенсивностей потоков рассеянного (J_{sct}) и отраженного (J_{rfl}) солнечного излучения от геометрии спутниковых наблюдений (угол сканирования, высота Солнца, относительный азимут), альbedo подстилающей поверхности (ПП), метеопараметров атмосферы и характеристик приземного аэрозоля. Иллюстрации некоторых результатов численного моделирования представлены на рис. 1 и 2, где значения интенсивностей нормированы в процен-

тах на величину солнечной постоянной в соответствующих спектральных интервалах.

На рис. 1 для первого канала AVHRR приведены зависимости интенсивностей потоков J_{sct} и J_{rfl} (альbedo $A = 0,1$) солнечного излучения от геометрии положения Солнца при наличии в приземном слое аэрозоля (тип – rural aerosol по классификации [7]) с метеорологической дальностью видимости (МДВ) равной 10 км.

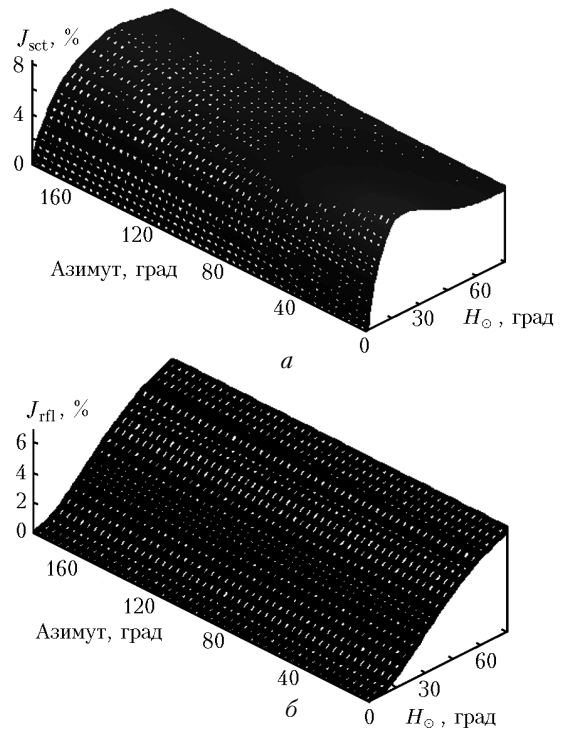


Рис. 1. Интенсивности потоков рассеянного (а) и отраженного от ПП (б) солнечного излучения в зависимости от геометрии наблюдений. Канал 1 AVHRR/NOAA ($\lambda = 0,63$ мкм), rural aerosol (МДВ = 10 км)

Как и следовало ожидать, интенсивность отраженного излучения монотонно увеличивается с ростом угловой высоты Солнца (H_{\odot}). При этом J_{rfl} не зависит от относительного азимута наблюдений (φ), который представляет собой проекцию на плоскость угла, образованного векторами «спутник–Солнце» и «спутник–точка наблюдения». В то же время интенсивность рассеянного излучения J_{sct} обладает следующими отличительными особенностями: а) J_{sct} зависит от φ ; б) при малых значениях $\varphi < 50^\circ$ и $H_{\odot} \approx 10\text{--}20^\circ$ формируется локальный максимум J_{sct} .

На рис. 2 для каналов 1 и 2 AVHRR приведены зависимости интенсивности потока рассеянного солнечного излучения для двух значений угла сканирования оси прибора ($\theta = 20$ и 40°), двух значений относительного азимута ($\varphi = 0$ и 180°) и двух значений метеорологической дальности видимости (20 и 2 км). Данные численного моделирования позволяют уточнить особенности поведения величины J_{sct} и сделать следующие выводы.

1. Зависимости J_{sct} от оптико-геометрических параметров наблюдений имеют для каналов 1 и 2 AVHRR близкий качественный характер.

2. Амплитуда локального максимума растет вместе с увеличением угла сканирования θ .

3. Локальный максимум наиболее выражен при значениях МДВ $\approx 10 \div 15$ км.

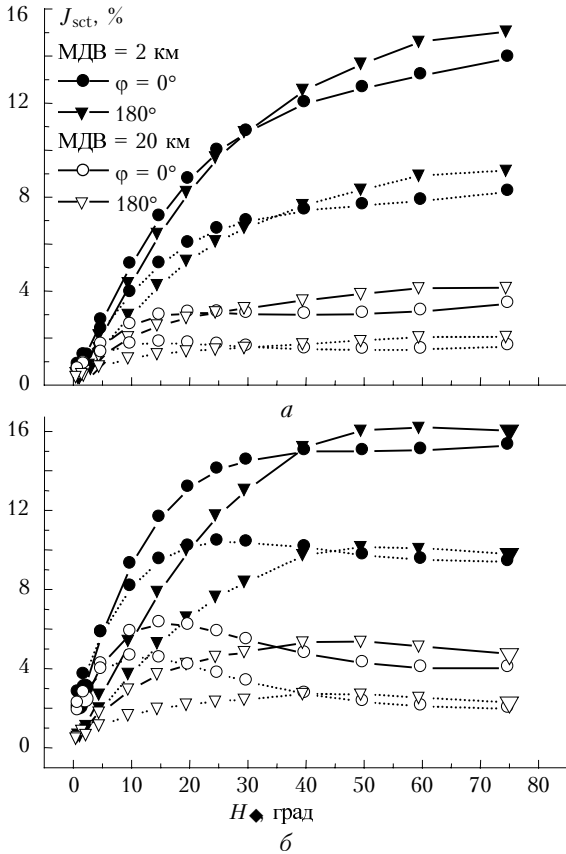


Рис. 2. Влияние геометрии наблюдений и МДВ на интенсивность потока рассеянного солнечного излучения в каналах AVHRR/NOAA: углы сканирования $\theta = 20^\circ$ (а), 40° (б); канал 1 (сплошные линии), канал 2 (пунктирные)

Из результатов численного моделирования, полученных для другого типа аэрозоля (urban aerosol [7]), следуют аналогичные выводы.

Для достижения основной цели работы осуществлялась обработка архивов спутниковых измерений J_{sat} (альbedo), представляющих собой значения интенсивности восходящего потока излучения на верхней границе атмосферы, нормированных в процентах на величину солнечной постоянной в соответствующих спектральных интервалах.

Величину J_{sat} можно выразить следующим образом:

$$J_{sat} = J_{sct} + J_{rfl} = J_{sct} + AJ_{\uparrow},$$

где J_{sct} и J_{rfl} – интенсивности потоков солнечного излучения, рассеянного атмосферой и отраженного ПП; A – альbedo ПП; J_{\uparrow} – интенсивность отраженно-

го от «зеркальной» ПП ($A = 1,0$) потока солнечного излучения.

Процедура обработки спутниковых данных состояла из следующих основных этапов.

1) Калибровка, географическая привязка и визуализация данных, отбраковка облачных снимков.

2) Вычисление для каждого спутникового снимка «молекулярных» (условия безаэрозольной атмосферы) значений интенсивностей рассеянного и отраженного от «зеркальной» ПП потоков солнечного излучения (J_{sct}^0 и J_{\uparrow}^0) на основе реальной для моментов проведения космомониторинга метеоинформации и параметров геометрии наблюдений.

3) Статистический анализ пространственно-временной изменчивости спутниковых данных в окрестностях пунктов наземных измерений с целью составления для видимых каналов AVHRR карт альbedo подстилающей поверхности $A(x,y)$.

Проведение статистического анализа временных рядов спутниковых снимков и построение карт альbedo ПП включали следующие основные моменты:

- отбор безоблачных изображений, соответствующих условиям максимально высокой прозрачности атмосферы (для контроля здесь привлекались результаты наземных измерений аэрозольных характеристик);
- вычисление значений альbedo

$$A(x,y) = (J_{sat}(x,y) - J_{sct}^0) / J_{\uparrow}^0;$$

- поиск «оптимальных» для космомониторинга аэрозоля участков подстилающей поверхности, характеризующихся малыми значениями альbedo и пространственной квазиоднородностью (с целью минимизации влияния ПП и ошибок геопривязки на результаты интерпретации спутниковых измерений);

- оценка сезонной и межгодовой изменчивости альbedo ПП.

4) Расчет спутниковых аэрозольных характеристик для «оптимальных» участков ПП

$$J_{aer}(x,y) = J_{sat}(x,y) - J_{sct}^0 - A(x,y,\theta,H_V) J_{\uparrow}^0$$

и проведение сравнительного анализа спутниковых данных J_{aer} и наземных измерений характеристик атмосферного аэрозоля. Необходимо отметить, что при вычислении J_{aer} производился приближенный учет влияния геометрии наблюдений на альbedo ПП как $A(x,y,\theta,H_V) = A(x,y) \cdot g(\theta,H_V)$, где вид и параметры функции $g(\theta,H_V)$ выбирались нами на основе данных работ [8, 9].

Рассмотрим далее иллюстрации результатов выполнения этапов описанной выше процедуры обработки спутниковых измерений.

Пример результатов выполнения этапа 2 представлен на рис. 3.

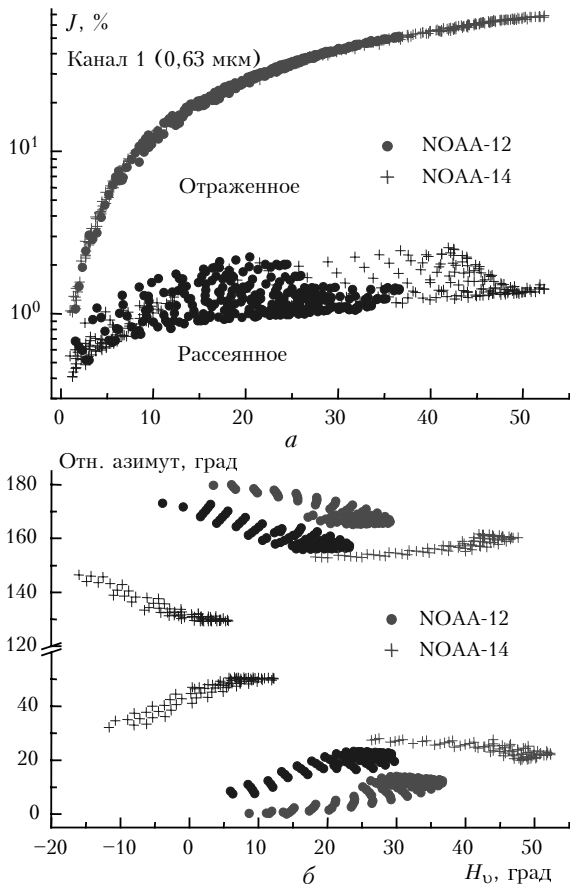


Рис. 3. Результаты расчетов интенсивностей потоков рассеянного и отраженного от ПП солнечного излучения для условий прозрачной атмосферы в окрестностях Томска (а). Геометрия положения Солнца в моменты спутниковых измерений (б)

Здесь приведены расчетные данные значений J_{sct}^0 и J_{\uparrow}^0 для канала 1 AVHRR и реальная информация о геометрии положения Солнца (H_{\odot} и φ) в момент проведения спутниковых измерений, которая была использована для расчета этих величин. Рис. 3 дополняется табл. 1 со статистическими данными о значениях J_{sct}^0 и J_{\uparrow}^0 для каналов 1 и 2 AVHRR и двух типов спутников.

Таблица 1

Статистические данные о значениях интенсивностей J_{sct}^0 и J_{\uparrow}^0 потоков рассеянного и отраженного от ПП солнечного излучения

Канал	Тип излучения, %	Среднее	СКО	Ошибка регрессии	Max
NOAA-12					
1	J_{\uparrow}^0	28,958	11,723	0,709	51,271
	J_{sct}^0	1,235	0,308	0,302	2,233
2	J_{\uparrow}^0	26,800	10,450	1,421	46,230
	J_{sct}^0	0,487	0,119	0,119	0,885
NOAA-14					
1	J_{\uparrow}^0	38,127	25,051	0,993	68,720
	J_{sct}^0	1,298	0,511	0,347	2,556
2	J_{\uparrow}^0	33,476	21,625	1,951	63,535
	J_{sct}^0	0,483	0,149	0,121	0,910

Иллюстрации результатов выполнения этапа 3 представлены на рис. 4. Здесь для канала 1 AVHRR спутника NOAA-14 приведены карты альbedo $A(x, y)$ двух участков ПП размером $0,6^\circ$ по широте на 1° по долготе ($\approx 67 \times 74$ км) в окрестности пунктов наземных измерений. Карты получены для июля 1999 г. С целью оценки межгодовой изменчивости этих данных были

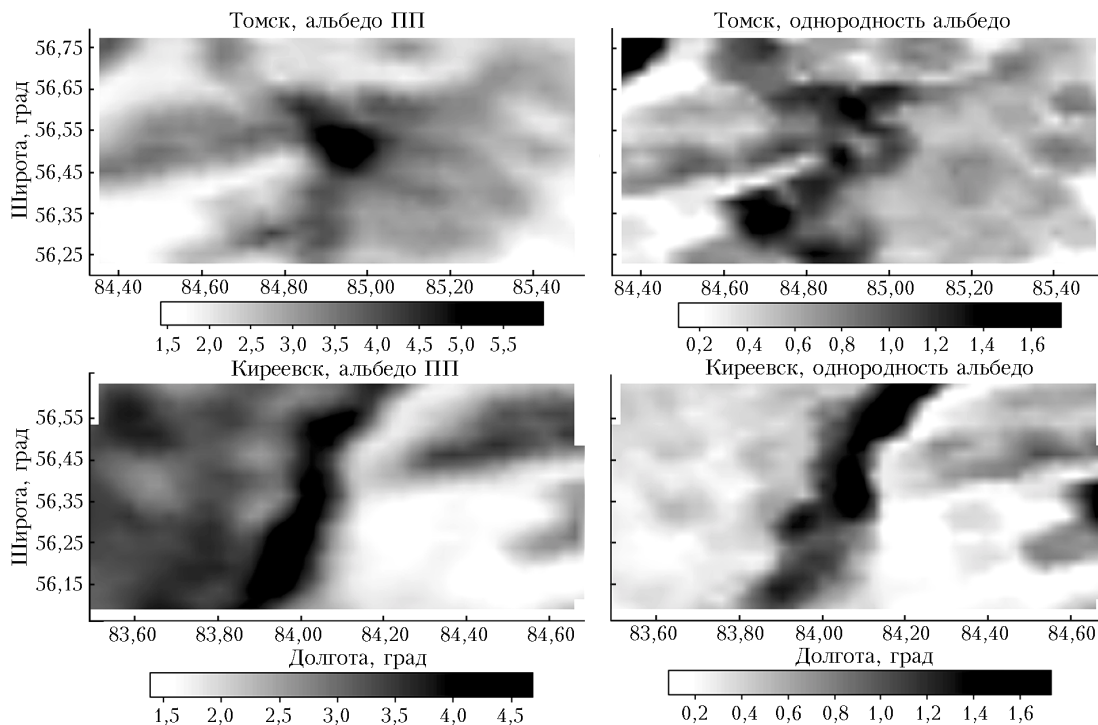


Рис. 4. Карты альbedo ПП и карты однородности альbedo (все значения увеличены в 100 раз) в окрестностях пунктов наземных измерений

построены аналогичные карты для июля 1998 г. Анализ июльских карт альbedo ПП за 1998 и 1999 гг. позволяет сделать вывод об их хорошей идентичности.

Так, расхождение значений $A(x,y)$ составляет в среднем всего 5–10%. На рис. 4 наряду с картами $A(x,y)$ также представлены карты характеристик пространственной однородности альbedo $\delta A(x,y)$ – среднеквадратическое отклонение значений $A(x,y)$ в окрестности 7×7 пикселей. Приведенные на рис. 4 данные позволяют отметить на картах достаточные по размеру пространственно однородные $\delta A(x,y) < 0,01$ участки ПП с малыми значениями альbedo $A(x,y) < 0,04$. Полученные при выполнении этого этапа результаты демонстрируют возможность составления на основе спутниковых изображений региональных каталогов сезонных карт альbedo с выделенными на них «оптимальными» для космомониторинга аэрозоля участками поверхности.

Иллюстрация результатов заключительного (четвертого) этапа обработки спутниковых измерений представлена на рис. 5.

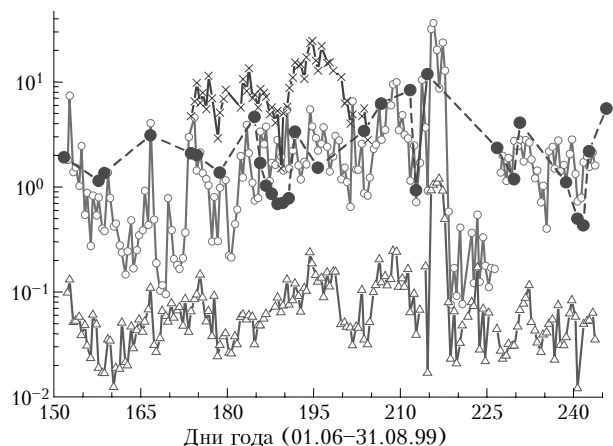


Рис. 5. Временной ход спутниковых данных (J_{aer}) и наземных измерений аэрозольных характеристик: \circ — \circ — счетная концентрация аэрозоля, см^{-3} ; \triangle — \triangle — коэффициент рассеяния ($\lambda = 0,52$ мкм), км^{-1} ; \times — \times — АОТ $\cdot 100$ ($\lambda = 0,63$ мкм); \bullet — \bullet — J_{aer} ($\lambda = 0,63$ мкм), %

Здесь приведены данные наземных измерений аэрозольных характеристик и значения J_{aer} (канал 1, NOAA-14) для одного из «оптимальных» участков ПП в окрестностях Томска за период 1.06.99–31.08.99. Анализ этих результатов позволяет отметить удовлетворительное совпадение временного хода наземных измерений и спутниковых данных.

Дополнением рис. 5 является табл. 2, где приведены коэффициенты корреляции R_{aer} между спутниковыми данными J_{aer} и наземными измерениями аэрозольных характеристик. Там же для каждой аэрозольной характеристики представлены ее статистические по выборке данные (средние по выборке значения, СКО и максимальные значения). Анализ табл. 2 позволяет сделать вывод о наличии положительной корреляционной связи между спутниковыми данными и наземными измерениями. Однако следует отметить,

что коэффициент корреляции между J_{aer} и содержанием сажи получился заметно меньше, чем для остальных характеристик.

Таблица 2

Коэффициенты корреляции R_{sat} и R_{aer} между наземными измерениями аэрозольных характеристик и спутниковыми данными J_{sat} и J_{aer} (N – объем выборки); приведены статистические данные об аэрозольных характеристиках

Аэрозольная характеристика	R_{sat}	R_{aer}	N	Среднее	СКО	Max
Томск						
АОТ	0,53	0,95	12	0,085	0,036	0,153
Счетная концентрация, см^{-3}	0,63	0,77	47	1,982	1,611	9,615
Коэффициент рассеяния, км^{-1}	0,52	0,64	37	0,094	0,076	0,314
Содержание сажи, $\text{мкг}/\text{м}^3$	0,05	0,39	37	0,904	0,747	3,441
Киреевск						
АОТ	0,89	0,91	10	0,251	0,192	0,609

Дополнительно в табл. 2 приведены коэффициенты корреляции R_{sat} между наземными измерениями аэрозольных характеристик и «исходными» спутниковыми данными J_{sat} . Сравнение R_{sat} и R_{aer} позволяет отметить для случая измерений в Томске их заметную ($R_{aer} > R_{sat}$ на 0,12–0,42) разницу, что отражает удовлетворительную эффективность выделения из спутниковых измерений аэрозольного вклада с помощью описанной выше процедуры обработки данных космомониторинга.

Потенциальная погрешность восстановления АОТ (как наиболее адекватной величине J_{aer}) в среднем составляет порядка 10% для канала 1 AVHRR, что хорошо согласуется с результатами работ [3, 5].

Вывод

Результаты проведенных исследований позволяют в целом сделать вывод о хорошей потенциальной возможности использования спутниковой системы AVHRR/NOAA в регионах Западной Сибири для космомониторинга свойств атмосферного аэрозоля (и в том числе дымов лесных пожаров) и оперативной оценки оптического состояния атмосферы с целью проведения атмосферной коррекции спутниковых данных. Для практической реализации этих возможностей необходима дальнейшая разработка адаптированных к региональным условиям наблюдений методов интерпретации спутниковых измерений и составления региональных каталогов карт альbedo подстилающей поверхности.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (Грант РФФИ № 01-05-65494).

1. Смоляков Б.С., Куценогий К.П., Макаров Г.А., Ковальская Г.А., Смирнова А.И., Павлюк Л.А., Фильмонова С.Н. Влияние лесных пожаров на химический состав аэрозоля // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 6. С. 523–527.

2. Кондратьев К.Я., Григорьев А.А., Покровский О.М., Шалина Е.В. Космическое дистанционное зондирование атмосферного аэрозоля. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 216 с.
3. Kaufman Y.J., Fraser R.S., and Ferrare R.A. Satellite Measurements of Large-Scale Air-Pollution: Methods // J. Geophys. Res. D. 1990. V. 95. № 7. P. 9895–9909.
4. Ferrare R.A., Fraser R.S., and Kaufman Y.J. Satellite Measurements of Large-Scale Air-Pollution: Measurements of Forest Fire Smoke // J. Geophys. Res. D. 1990. V. 95. № 7. P. 9911–9925.
5. Kaufman Y.J. Aerosol Optical Thickness and Atmospheric Path Radiance // J. Geophys. Res. D. 1993. V. 98. № 2. P. 2677–2692.
6. Кондратьев К.Я. Некоторые результаты и перспективы дистанционного зондирования тропосферного аэрозоля // Исслед. Земли из космоса. 1998. № 5. С. 103–126.
7. Kneizys F.X., Shettle E.P., Abreu L.W., Chetwynd J.H., Anderson G.P., Gallery W.O., Selby J.E.A., Clough S.A. User's Guide to LOWTRAN-7, AFGL-TR-88-0177. ERP. N 1010. AFGL, Hansom AFB. MA 0173, 1988. 138 с.
8. Кондратьев К.Я., Биненко В.И., Дьяченко Л.Н., Корзов В.И., Мухенберг В.В. Альbedo и угловые характеристики отражения подстилающей поверхности и облаков. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 232 с.
9. Козодеров В.В., Диринг Д.У. Региональные исследования поверхности суши с помощью космических средств // Исслед. Земли из космоса. 1993. № 2. С. 63–75.

S.V. Afonin, V.V. Belov, B.D. Belan, M.V. Panchenko, S.M. Sakerin, D.M. Kabanov. **Comparison of NOAA AVHRR data with ground-based measurements of atmospheric aerosol characteristics.**

This paper presents the results of comparative analysis of satellite data with ground-based measurements of aerosol characteristics at the territory of the Tomsk Region. The analysis was aimed at evaluation of applicability of NOAA AVHRR data to determination of properties of atmospheric aerosol and smokes from forest fires. The results obtained demonstrate high potentialities of the NOAA AVHRR data for real-time space monitoring of atmospheric aerosol and assessment of the optical state of the atmosphere over the Western Siberia.