

С.В. Афонин

## Некоторые результаты изучения характеристик оптического состояния атмосферы в Томском регионе по спутниковым данным MODIS

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 7.02.2005 г.

По спутниковым данным MODIS Aerosol Products (2001–2003 гг.) выполнен статистический анализ характеристик оптического состояния атмосферы в Томском регионе (аэрозольной оптической толщи и количества облачности).

### Введение

В последние годы в Институте оптики атмосферы (ИОА) СО РАН ведутся активные работы по изучению метеорологических и аэрозольных характеристик атмосферы в Томском регионе с привлечением спутниковых данных NOAA и MODIS [1–7]. Важность таких исследований объясняется следующими обстоятельствами.

Во-первых, изучение региональных свойств атмосферного аэрозоля, его пространственной и временной динамики является перспективным направлением ряда международных научных проектов (например, IGAC, GOF-C-GOLD), в документах которых отмечается необходимость использования для достижения поставленных задач всех средств проведения исследований, включая спутниковые измерения.

Во-вторых, статистический анализ этих данных позволяет исследовать вариабельность искажающих оптических свойств атмосферы с целью развития методов атмосферной коррекции результатов мониторинга подстилающей поверхности из космоса, в том числе применительно и к задаче обнаружения со спутников малоразмерных очагов пожаров [8].

В качестве информационной основы исследований в данной статье была использована создаваемая в ИОА СО РАН региональная коллекция спутниковых данных MODIS Aerosol Products [9], полученных через INTERNET из архивов подразделения NASA Goddard Distributed Active Archive Center (DAAC). Данные MODIS Aerosol Products (MOD04, Level 2) записаны в файлы (гранулы) размером 11 Мбайт и представляют набор матриц, каждый элемент которых имеет пространственное разрешение  $10 \times 10$  км в надире. Обозначим элемент указанной матрицы как M10. Гранулы включают геокационные параметры, параметры геометрии наблюдения и положения Солнца, оптические характеристики аэрозоля, характеристики состояния облачности, оценки точности восстановленных парамет-

ров и т.д. В сутки формируются 144 гранулы с данными, пространственно покрывающими всю поверхность океана и, за небольшим исключением, всю поверхность суши. Как и вся спутниковая информация, предоставляемая NASA, эти данные записаны в HDF-EOS формате /Hierarchical Data Format for storing data from the Earth Observing System (EOS)/, разработанном специально для этих целей.

В данной работе с использованием 1890 гранул типа MOD04/Terra были проведены исследования характеристик оптического состояния атмосферы в Томском регионе ( $55\text{--}62^\circ$  с.ш.,  $74\text{--}90^\circ$  в.д.) для временного интервала от 11 до 15,5 ч местного времени за пожароопасные периоды (с апреля по октябрь) 2001–2003 гг.

### 1. Статистический анализ аэрозольных характеристик

Статистический анализ оптического состояния атмосферы в Томском регионе включал в первую очередь исследование аэрозольной оптической толщи (АОТ или  $\tau$ ) на длине волны  $\lambda = 0,55$  мкм.

В результате обработки региональных спутниковых данных MODIS Aerosol Products (MOD04, Level 2) были получены и проанализированы следующие результаты:

- 1) гистограммы и функции распределения АОТ для каждого года (2001–2003 гг.);
- 2) статистические характеристики АОТ для каждого заданного месяца (апрель–октябрь);
- 3) пространственные распределения в регионе  $\tau(x, y)$  – усредненных за сезон значений АОТ.

#### 1.1. Анализ гистограмм и статистических характеристик

Анализ данных об аэрозольной оптической толщине (рис. 1) позволяет сделать два основных вывода.

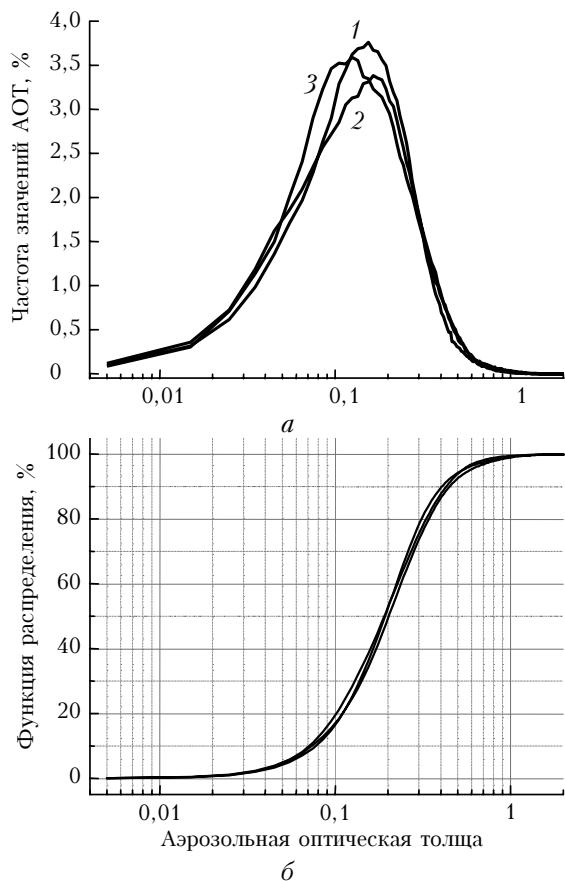


Рис. 1. Гистограммы (а) и функции распределения (б) значений АОТ (длина интервала 0,01); Томский регион (55–62° с.ш., 74–90° в.д.), апрель–октябрь 2001–2003 гг.; 1 – 2001 г., 2 – 2002 г., 3 – 2003 г.

1) Первый вывод говорит об относительно слабой межгодовой вариабельности этих гистограмм значений АОТ (рис. 1, а); их максимумы лежат в диапазоне от 0,13 до 0,17.

2) Второй вывод основан на данных о функции распределения АОТ (рис. 1, б) и говорит о том, что слабо замутненные оптические ситуации с  $\tau < 0,2$  (метеорологическая дальность видимости МДВ  $> 40$  км) встречаются более чем в 50% ситуаций. В то же время частота появления относительно высоких значений  $\tau > 1$  (МДВ менее 6 км) составляет менее 0,5–1%.

Интересные результаты можно получить и при анализе усредненных по месяцам характеристик АОТ (рис. 2).

Прежде всего, данные рис. 2 говорят о слабой межгодовой вариабельности статистических характеристик АОТ для периода апрель–июль. Расхождение для средних значений для этих месяцев составляет менее 15%. В то же время наблюдаются заметные межгодовые различия (1,5–2 раза) для осенних месяцев, одной из причин которых может быть появление в регионе дымов от крупных лесных пожаров (как это наблюдалось в конце августа – в начале сентября 2002 г.). Несмотря на указанные флуктуации, усредненное за сезон значение АОТ оказалось величиной практически постоянной (0,23–0,25), а ее межгодовые различия составили менее 10%.

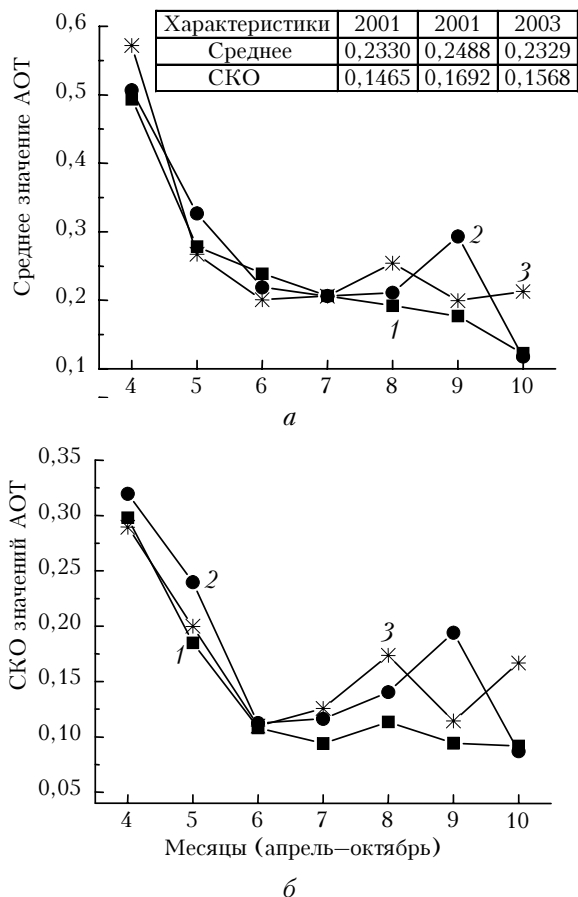


Рис. 2. Средние за месяц значения АОТ (а) и их СКО (б); Томский регион (55–62° с.ш., 74–90° в.д.), апрель–октябрь 2001–2003 гг. Обозначения кривых см. на рис. 1

## 1.2. Анализ пространственных распределений

Анализ пространственных распределений усредненных за сезон значений АОТ  $\tau(x, y)$  производился в Томском регионе для масштабов пространственного усреднения порядка  $50 \times 50$  км. Для этого заданный регион был разбит на 224 участка размером  $0,5^\circ$  по широте и  $1^\circ$  по долготу.

На рис. 3 для 2001–2003 гг. представлены три карты  $\tau(x, y)$ . Анализ данных рис. 3 позволяет сделать вывод об относительно слабой пространственной вариабельности значений  $\tau(x, y)$ . Так, диапазон максимальных различий этих данных составил величину порядка 0,11–0,14, а значения СКО составляют диапазон 0,020–0,025. Для сравнения можно указать погрешность данных MODIS Aerosol Products  $\Delta\tau$ , равную согласно [10, 11]  $\pm 0,05 \pm 0,2\tau$ .

При этом вид гистограммы значений  $\tau(x, y)$  позволяет предположить, что статистический закон распределения  $\tau(x, y)$  близок к нормальному закону (рис. 3).

В то же время, сравнивая данные  $\tau(x, y)$  за 2001 и 2002 гг., следует обратить внимание на следующее обстоятельство. Несмотря на фактическую пространственную однородность распределений  $\tau(x, y)$ ,

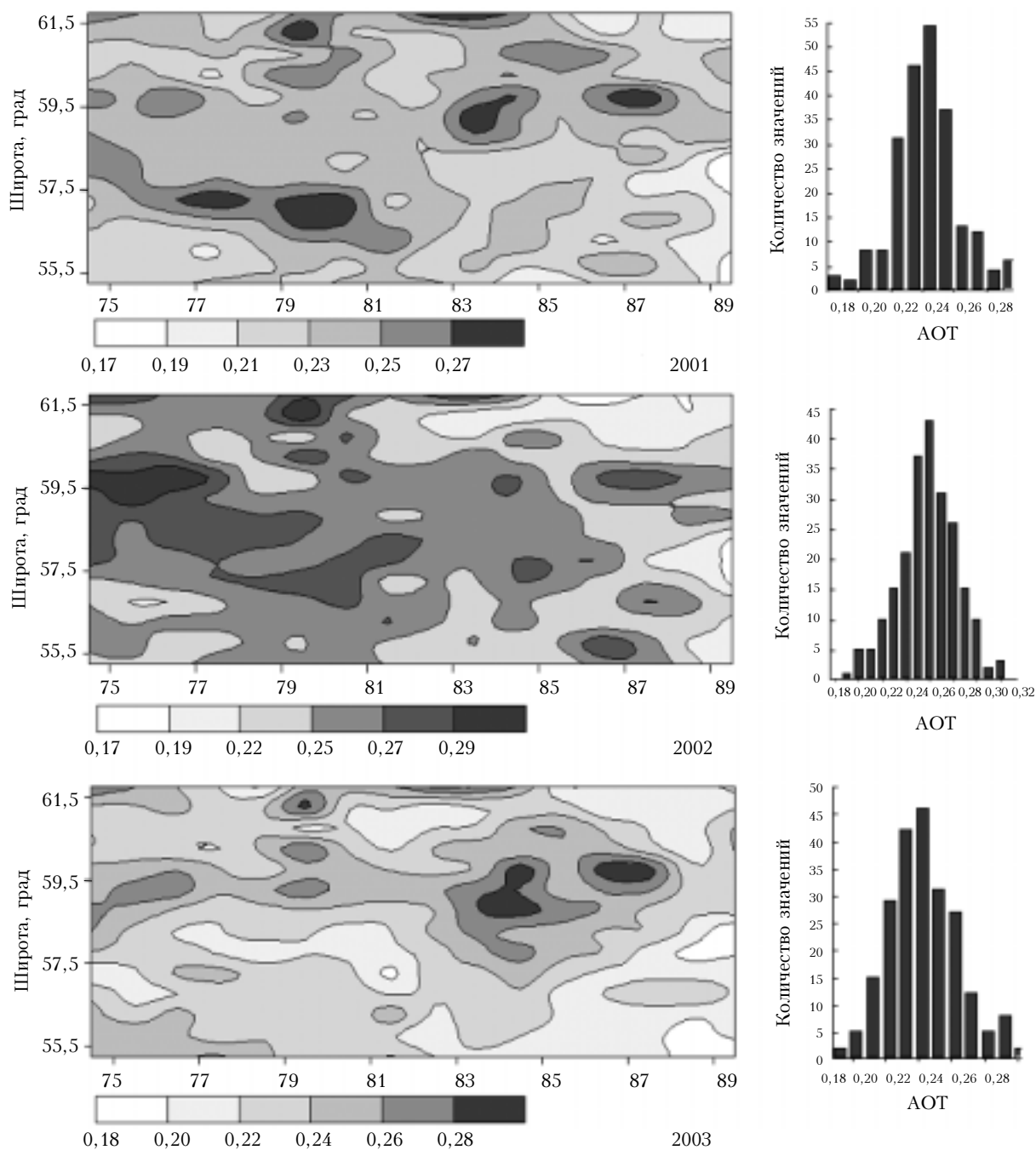


Рис. 3. Пространственные распределения усредненных за сезон значений АОТ и их гистограммы; Томский регион (55–62° с.ш., 74–90° в.д.), апрель–октябрь 2001–2003 гг.

они имеют явно выраженные структуры, отдельные детали которых для данных за 2001 и 2002 гг. имеют сходный вид (см. рис. 3). При этом коэффициент корреляции между данными за 2001 и за 2002 гг. достигает 0,7. В дальнейшем планируется более детально исследовать причину этого факта.

## 2. Статистический анализ характеристик облачности

Статистический анализ оптического состояния атмосферы в Томском регионе наряду с аэрозольны-

ми характеристиками включал изучение простейших характеристик облачности.

Для удобства дальнейшего изложения введем ряд обозначений:

- $F_{cld}$  – относительная доля облачности в элементе М10 (диапазон значений 0–100%);
- $NF$  – количество элементов М10, имеющих фиксированное значение  $F_{cld}$ ;
- $N10$  – общее количество элементов М10 (в одной матрице или в заданной их совокупности);
- $S_{cld}$  – относительная площадь закрытой облачностью территории региона, равная  $(1/N10) \times \sum_k [NF(k) F_{cld}(k)]$ , где  $k = 1, \dots, N10$ .

С целью проведения исследований были обработаны соответствующие данные гранул MOD04 и получены следующие результаты:

- 1) гистограммы и частотные распределения  $F_{cld}$  для каждого года;
- 2) статистические характеристики  $S_{cld}$  для каждого месяца;
- 3) пространственные распределения в регионе усредненных за сезон значений  $S_{cld}(x, y)$ .

### 2.1. Анализ гистограмм и статистических характеристик

Анализ данных о величине  $F_{cld}$ , приведенных на рис. 4, позволяет сделать следующие основные выводы.

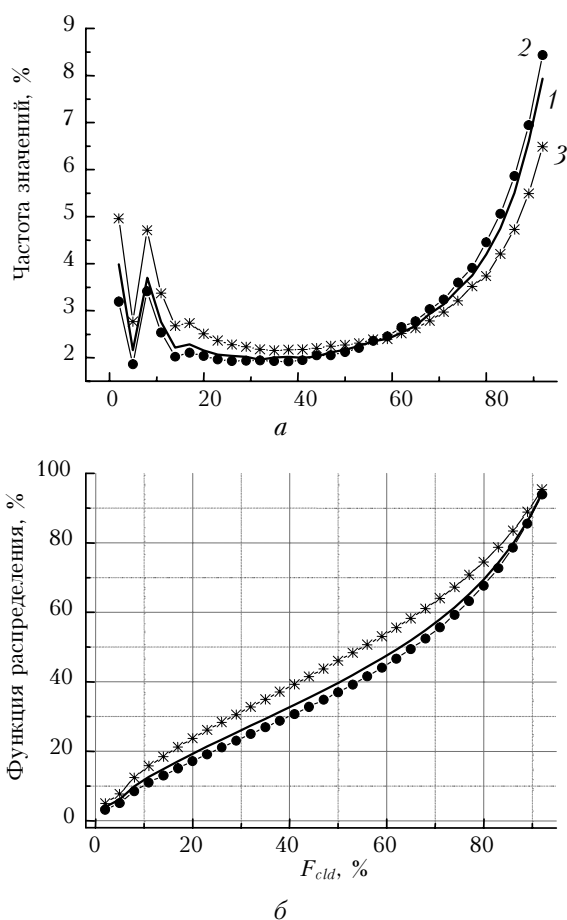


Рис. 4. Гистограммы (а) и функции распределения (б) значений  $F_{cld}$  (длина интервала 3%); Томский регион (55–62° с.ш., 74–90° в.д.), апрель–октябрь 2001–2003 гг. Обозначения кривых см. на рис. 1

- 1) Гистограммы значений  $F_{cld}$  имеют слабые межгодовые различия (рис. 4, а). При этом наблюдается характерный вид функции  $F_{cld}$ : а) небольшой по амплитуде локальный максимум в районе значений  $F_{cld}$  порядка 8%; б) глобальный минимум в диапазоне 30–40%; в) достаточно быстрый рост частоты появления высоких значений  $F_{cld}$ .

2) При проведении в Томском регионе мониторинга подстилающей поверхности из космоса необходимо учитывать тот факт, что доля малооблачных элементов M10 ( $F_{cld} < 50\%$ ) будет практически линейно уменьшаться пропорционально величине  $F_{cld}$  (рис. 4, б).

Анализ усредненных по месяцам величин  $S_{cld}$  (рис. 5) позволяет отметить их значительную как межгодовую, так и сезонную изменчивость. При этом выделим ряд характерных деталей поведения  $S_{cld}$ :

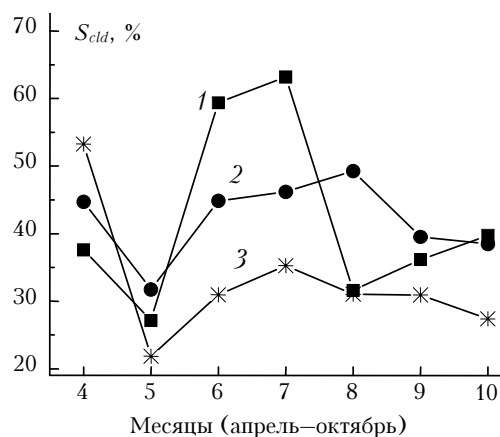


Рис. 5. Средние за месяц значения  $S_{cld}$ ; Томский регион (55–62° с.ш., 74–90° в.д.), апрель–октябрь 2001–2003 гг. Обозначения кривых см. на рис. 1

- а) наличие минимума  $S_{cld}$  в мае;
- б) наличие повышенных значений  $S_{cld}$  в летние месяцы.

Средние за сезон значения  $S_{cld}$  изменяются в диапазоне 30–45%.

### 2.2. Анализ пространственных распределений

Анализ пространственных усредненных за сезон значений  $S_{cld}$  (как и в случае АОТ) производился в Томском регионе для 224 участков размером 0,5° по широте и 1° по долготе (масштаб пространственного усреднения порядка 50×50 км).

На рис. 6 для 2001–2003 гг. представлены три карты  $S_{cld}(x, y)$ . Анализ данных рис. 6 позволяет сделать вывод о заметной пространственной вариативности значений  $S_{cld}$ . Так, диапазон максимальных различий этих данных составил величину порядка 12–18%, а значения СКО составляют диапазон 3–4%.

Анализируя карты  $S_{cld}(x, y)$ , уже нельзя сделать выводы об их квазиоднородности или о наличии схожих для всех трех карт пространственных структур. Однако при этом следует указать на тот факт, что более высокие значения  $S_{cld}$  чаще появляются в северных широтах региона. То есть именно в этой пространственной зоне региона мониторинг подстилающей поверхности из космоса будет менее эффективен за счет мешающей роли облачности.

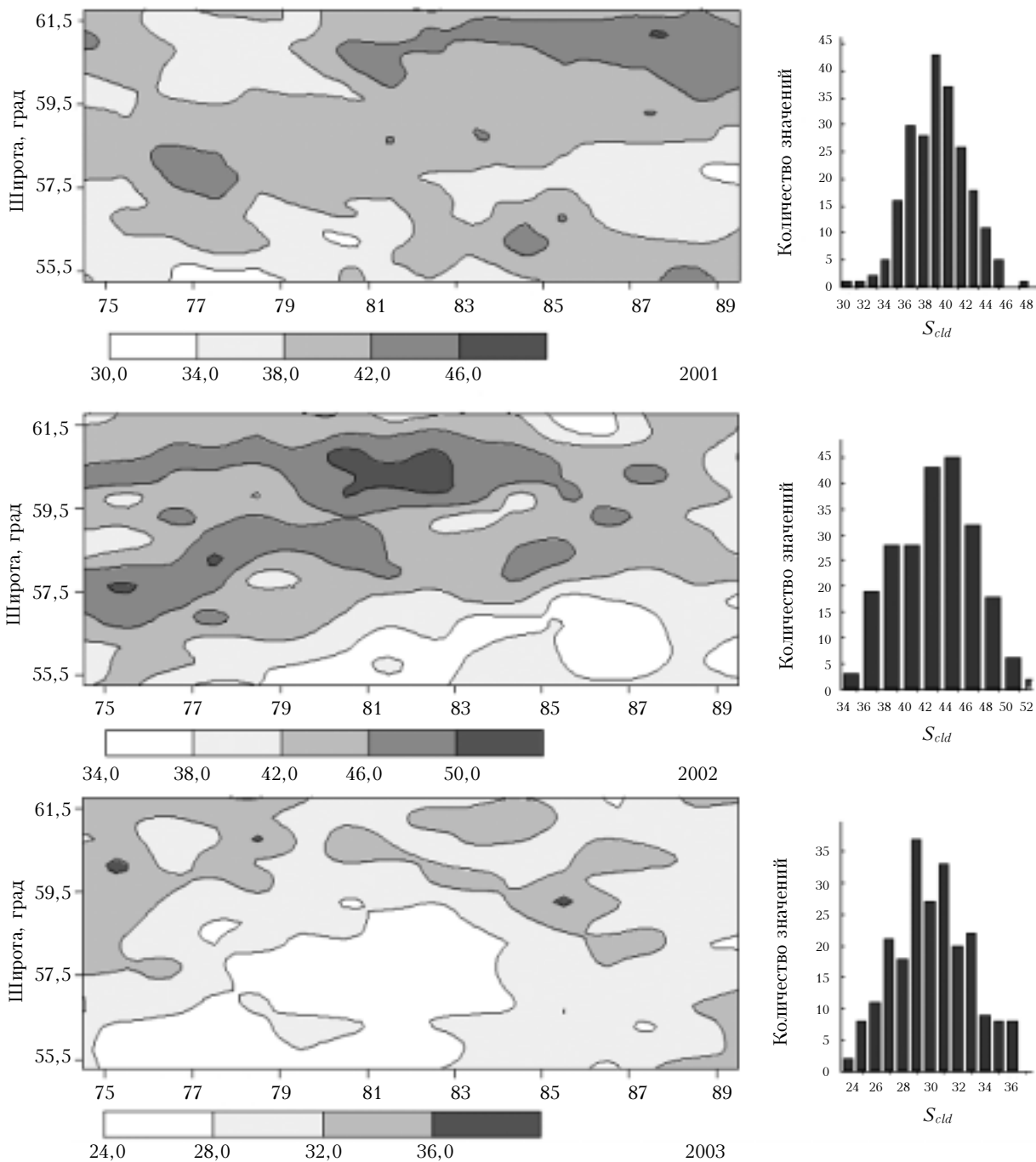


Рис. 6. Пространственные распределения усредненных за сезон значений  $S_{cld}$  и их гистограммы; Томский регион (55–62° с.ш., 74–90° в.д.), апрель–октябрь 2001–2003 гг.

### Заклучение

В результате проведенных исследований получены статистические характеристики пространственной и временной изменчивости аэрозольной оптической толщи и количества облачности. Эти результаты позволяют определить наиболее вероятные оптические условия проведения спутниковых наблюдений подстилающей поверхности в регионе, дают возможность оптимизировать выполнение атмосферной

коррекции спутниковых измерений и повысить эффективность тематической обработки спутниковых данных.

Данные, использованные в этой работе, получены в рамках инициативы NASA's Earth Science Enterprise. Алгоритмы разработаны MODIS Science Teams. Данные, прошедшие обработку в MODIS Adaptive Processing System (MODAPS) и Goddard Distributed Active Archive Center, архивируются и распространяются Goddard DAAC.

Автор выражает искреннюю признательность д.ф.-м.н. Владимиру Васильевичу Белову за полезные дискуссии при выполнении этой работы и обсуждение ее результатов. Также автор выражает благодарность Марине Владимировне Энгель за помощь в работе с региональным архивом данных MODIS Aerosol Products.

1. *Афонин С.В., Белов В.В., Белан Б.Д., Панченко М.В., Сакерин С.М., Кабанов Д.М.* Сравнение спутниковых (AVHRR/NOAA) и наземных измерений характеристик атмосферного аэрозоля // *Оптика атмосф. и океана*. 2002. Т. 15. № 12. С. 1118–1123.
2. *Афонин С.В., Белов В.В.* Анализ оптических условий космомониторинга лесных пожаров в Томском регионе // 5-я Междунар. конф. «Природные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия»: Сб. тез. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 2003. С. 46–47.
3. *Afonin S.V., Belov V.V.* Statistical analysis of regional satellite data on the optical state of the atmosphere // *X<sup>th</sup> Joint International Symposium «Atmospheric and ocean optics. Atmospheric physics»*: Symp. Abstracts. Tomsk: IAO SB RAS, 2003. P. 95.
4. *Афонин С.В., Белов В.В.* Региональный спутниковый мониторинг атмосферного аэрозоля // *Всес. конф. «Дистанционное зондирование поверхности земли и атмосферы»*: Сб. тез. Иркутск: Изд-во ИСЗФ СО РАН, 2003. С. 27.
5. *Афонин С.В., Белов В.В., Энгель М.В.* Статистический анализ оптико-метеорологических параметров атмосферы Томского региона на основе спутниковых данных MODIS // *Междунар. симп. стран СНГ по атмосферной радиации «МСАР–04»*: Тез. докл. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. С. 102–103.
6. *Afonin S.V., Belov V.V., Engel' M.V.* Study of optical and meteorological parameters of the atmosphere in the Tomsk region based on the MODIS Atmosphere Products satellite data // *XI<sup>th</sup> Internat. Symp. «Atmospheric and ocean optics. Atmospheric physics»*: Symp. Abstracts. Tomsk: IAO SB RAS, 2004. P. 103.
7. *Афонин С.В., Белов В.В., Энгель М.В.* Использование спутниковых данных MODIS Atmosphere Products // *Междунар. конф. по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды ENVIROMIS 2004*: Тезисы докл. Томск: Изд-во ГУ «Томский ЦНТИ», 2004. С. 45–46.
8. *Афонин С.В., Белов В.В.* Информационно-методические основы построения эффективных систем спутникового мониторинга лесных пожаров // *Вычислительные технологии*. 2003. Т. 8. № 11. Спец. выпуск. С. 35–46.
9. *Афонин С.В., Белов В.В., Энгель М.В., Кох А.М.* Разработка в ИОА СО РАН базы данных региональной спутниковой информации и программного обеспечения для ее обработки // *Оптика атмосф. и океана*. 2005. Т. 18. № 1–2. С. 52–60.
10. *Kaufman Y.J., Tanre D., Remer L.A., Vermote E.F., Chu A., and Holben B.N.* Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. P. 17051–17068.
11. *Афонин С.В., Белов В.В., Энгель М.В., Кох А.М.* Валидация региональных спутниковых данных MODIS Aerosol Products (MOD04) // *Вторая Всерос. конф. «Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы космическими средствами»*: Тезисы докл. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2004. Т. 2. С. 27–31.

**S.V. Afonin. Some results of studying characteristics of the atmospheric optical state based on MODIS satellite data.**

Based on the MODIS Aerosol Products satellite (2001–2003), the statistical analysis of characteristics of the atmospheric optical state is performed (aerosol optical thickness and cloudiness).