

# АНАЛИЗ РЕГИОНАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ MODIS PRODUCTS

С.В. Афонин, В.В. Белов, М.В. Энгель

*Институт оптики атмосферы СО РАН*

*634055, Томск, пр. Академический, 1*

*E-mails: afonin@iao.ru; belov@iao.ru; angel@iao.ru*

В настоящее время для решения широкого спектра задач мониторинга подстилающей поверхности и атмосферы из космоса большой интерес представляют данные 36-канального радиометра MODIS, получаемые со спутников TERRA и AQUA. Для потребителей этих данных в Goddard Distributed Active Archive Center (DAAC) созданы архивы спутниковой информации MODIS, содержащие как результаты первичной обработки измерений различного уровня, так и результаты их тематической обработки (MODIS Atmosphere Products, MODIS Land Products). В работе представлены результаты статистического анализа для Томского региона двух типов данных MODIS Products – данных MODIS Aerosol Product (MOD04) и данных MODIS Fire Product (MOD14).

## Введение

Начиная с 2000 года, в Институте оптики атмосферы (ИОА) СО РАН на основе данных различных спутниковых систем ведутся активные работы [1–5] по изучению региональных свойств атмосферы и её компонентов, пространственной и временной динамики параметров окружающей среды.

Для проведения этих исследований активно используется создаваемая в ИОА СО РАН база спутниковой информации для территории Западной Сибири [6], включающая данные MODIS Atmosphere Products (collection 4), полученные через INTERNET из архивов подразделения NASA Goddard Distributed Active Archive Center (DAAC). На основе спутниковых данных MODIS Aerosol Product (MOD04) [7] в работе был выполнен статистический анализ и валидация некоторых характеристик оптического состояния атмосферы в Томском регионе (55–62°с.ш., 74–90°в.д.) за пожароопасные сезоны (с апреля по октябрь) 2001–2003 гг.

Одна из актуальных задач дистанционного зондирования подстилающей поверхности из космоса связана с оперативным обнаружением очагов пожаров в лесах и на промышленных объектах. При этом важно обнаружить пожар еще на ранней стадии развития, когда его ликвидация не требует больших усилий. Поэтому в этой работе на основе данных за пожароопасный сезон 2003 года была проведена оценка эффективности использования в Томском регионе информации MODIS Fire Product (MOD14) [8,9]. В качестве объективных данных для тестирования спутниковых алгоритмов детектирования пожаров использовалась официальная информация Томских служб пожароохраны лесов.

## 1. Анализ аэрозольных характеристик (MOD04\_L2)

Для изучения аэрозольных характеристик в Томском регионе в этой работе был проведен статистический анализ данных MODIS Aerosol Product с использованием 1890 файлов (гранул) типа MOD04 (Level 2) за 2001–2003 гг. Данные гранулы представляют собой набор матриц. Каждый элемент такой матрицы имеет пространственное разрешение 10×10 км при надирных измерениях (обозначим для удобства элемент указанной матрицы как M10). В качестве информации для осуществления валидации спутниковых данных были использованы результаты фотометрических измерений спектральной аэрозольной оптической толщины (АОТ), регулярно осуществляемых в ИОА СО РАН [10].

Сравнительный анализ спутниковых и наземных измерений АОТ проводился для длин волн  $\lambda=0.47$ , 0.55 и 0.66 мкм. Сопоставление спутниковых и наземных измерений позволяет отметить близкие для них значения отношений АОТ в каналах  $\lambda=0.47$  и 0.66 мкм ( $\tau_{0,66}/\tau_{0,47} \approx 0.63$ ). В то же время в случае спутниковых значений АОТ наблюдаются более низкие характеристики корреляции  $\tau_{0,66}$  и  $\tau_{0,47}$  (коэффициент корреляции  $r=0.89$ , СКО=0.055) по сравнению с данными наземных измерений ( $r=0.96$ , СКО=0.023). При этом спутниковые значения АОТ превышают данные наземных измерений в среднем на 0.13–0.06 в зависимости от длины волны.

Один из результатов сравнения спутниковых и наземных измерений АОТ, относящихся к пожароопасному сезону 2002 года, приведен на рисунке 1 и позволяет сделать основной вывод об удовлетворительном совпадении для Томска спутниковых данных MODIS Aerosol Product (MOD04, Level 2) и наземных фотометрических измерений АОТ. Так, различия АОТ для двух типов данных в целом удовлетворяют известному [7] соотношению  $\Delta\tau=\pm 0.05\pm 0.2\tau$ .

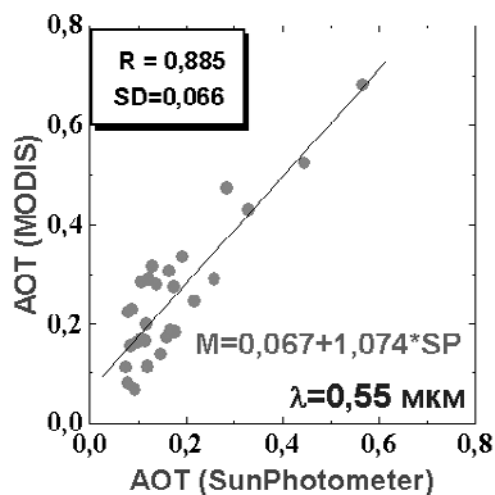


Рис. 1. Результаты валидации АОТ для Томска (2002 год).

В результате статистической обработки региональных спутниковых данных MODIS Aerosol Product были получены и проанализированы следующие результаты:

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

Анализ данных об аэрозольной оптической толщине на длине волны  $\lambda=0.55\mu\text{м}$ , приведенных на рисунке 2, позволяет сделать следующие выводы.

- 1) Наблюдается относительно слабая межгодовая вариабельность гистограмм значений АОТ (рис. 2а), их максимумы лежат в диапазоне от 0.13 до 0.17.
- 2) Слабо замутненные оптические ситуации с  $\tau < 0,2$  (метеорологическая дальность видимости МДВ  $> 40$  км) встречаются более чем в 50% ситуаций (рис.2б). В то же время частота появления высоких значений  $\tau > 1$  (МДВ  $< 5$  км) составляет менее 1%.

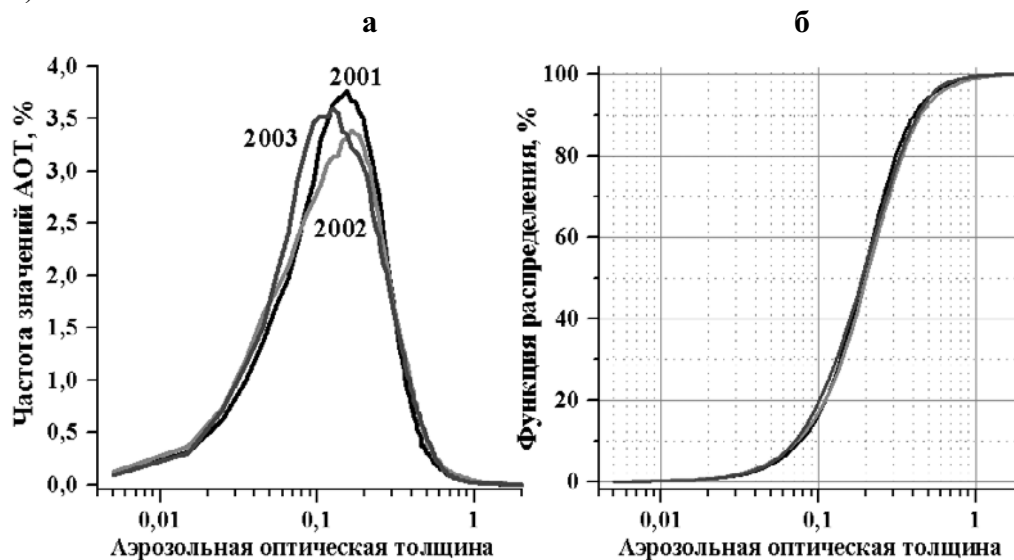


Рис. 2. Гистограммы (а) и функции распределения (б) значений АОТ.

Анализ усредненных по месяцам характеристик АОТ (рисунок 3) для временного периода с апреля по июль также приводит к выводу о слабой межгодовой вариабельности статистических характеристик АОТ. Расхождения средних значений для этих месяцев составляют 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 это, среднее за сезон значение АОТ оказалась величиной практически постоянной (0.23–0.25), а её межгодовые различия составили менее 10%.

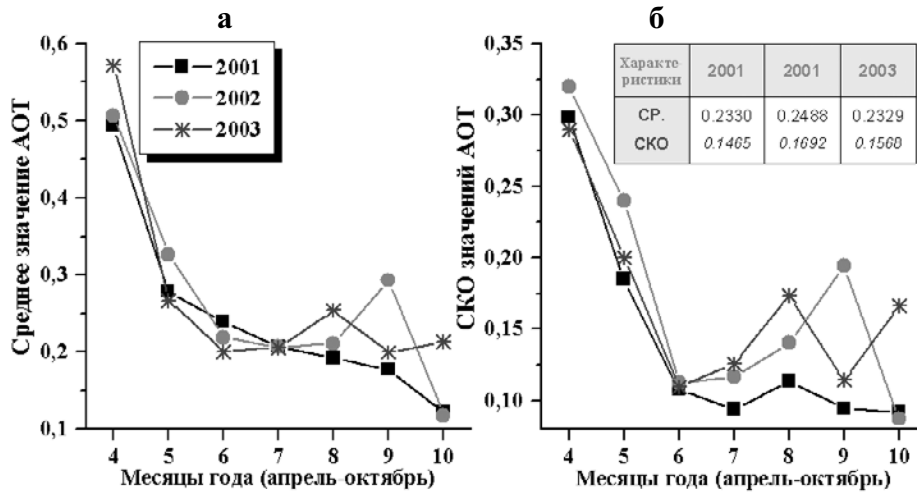


Рис. 3. Средние за месяц значения АОТ (а) и их СКО (б).

Анализ пространственных распределений  $\tau(x,y)$  усредненных за сезон значений АОТ производился для Томского региона при масштабе 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 долготе.

На рисунке 4 для 2001–2003 гг. представлены три карты  $\tau(x,y)$ . Анализ данных рис.4 позволяет сделать вывод об относительно слабой пространственной вариабельности значений  $\tau(x,y)$ . Так, диапазон максимальных различий этих данных составил величину порядка 0.11 и 0.14 (2002 год), а значения СКО составляют диапазон 0.020–0.025. Для сравнения можно указать погрешность данных MODIS Aerosol Product, равную величине  $\Delta\tau = \pm 0.05 \pm 0.2\tau$ . При этом вид гистограммы значений  $\tau(x,y)$  на рис.4 позволяет предположить, что статистический закон распределения  $\tau(x,y)$  близок к нормальному.

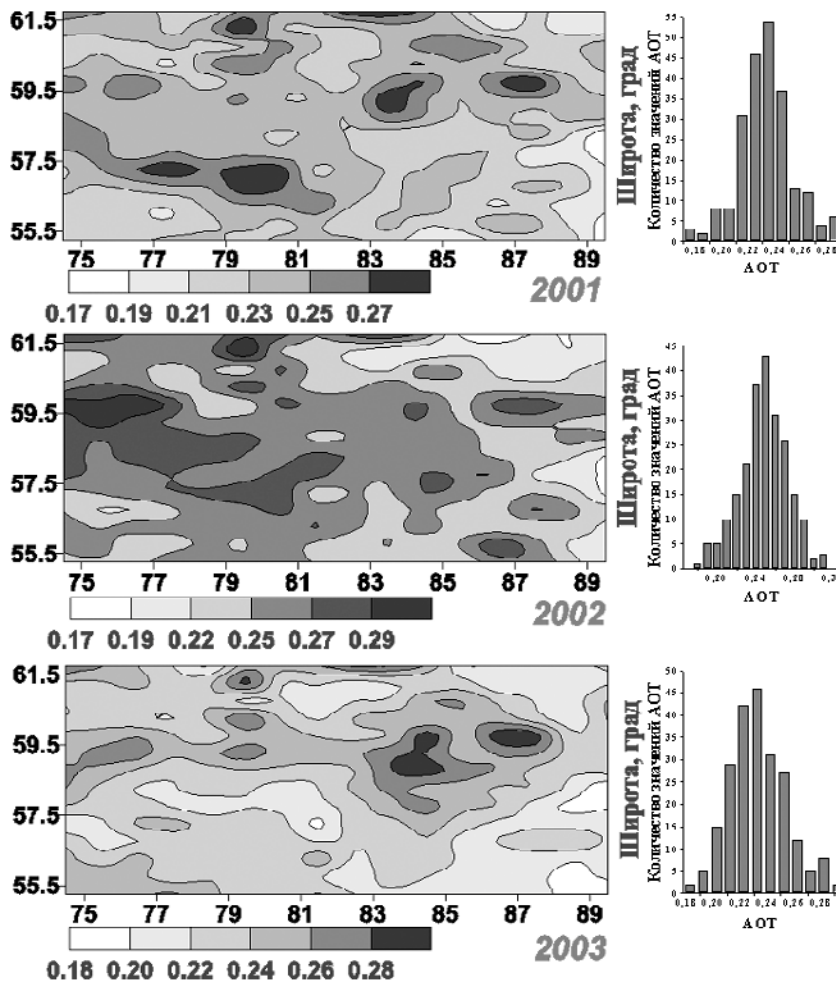


Рис. 4. Пространственные распределения усредненных за сезон значений АОТ и их гистограммы.

В то же время, сравнивая данные  $\tau(x,y)$  за 2001 и 2002 годы, стоит обратить внимание на следующее обстоятельство. Несмотря на фактическую пространственную однородность распределений  $\tau(x,y)$ , они имеют явно выраженные структуры, отдельные детали которых для данных за 2001 и 2002 годы имеют сходный вид. При этом коэффициент корреляции между данными за 2001 год и за 2002 год достигает величины 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 аэрозольными характеристиками включал изучение простейших характеристик облачности. Для удобства дальнейшего изложения введем ряд обозначений:

- 1)  $F_{CLD}$  – относительная доля облачности в элементе M10 (диапазон значений 0–100 %);
- 2)  $NF$  – количество элементов M10, имеющих значение  $F_{CLD}$ ;
- 3)  $N10$  – общее количество элементов M10 (в одной матрице или в заданной их совокупности);
- 4)  $S_{CLD}$  – относительная площадь закрытой облачностью территории региона, равна сумме  $S_{CLD} = (1/N10) \sum_k [NF(k) \cdot F_{CLD}(k)]$ , где  $k=1, \dots, N10$

Были обработаны соответствующие данные гранул MOD04 и получены следующие результаты:

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

Анализ данных о величине  $F_{CLD}$ , приведенных на рисунке 5, позволяет сделать следующие основные выводы.

1) Гистограммы значений  $F_{CLD}$  имеют слабые межгодовые различия (рис. 5а). При этом наблюдается следующий характерный вид функции  $F_{CLD}$ : а) небольшой по амплитуде локальный максимум в районе 8%; б) глобальный минимум в районе 30–40%; в) достаточно быстрый рост частоты появления высоких значений  $F_{CLD}$ .

2) Для Томского региона характерен тот факт, что доля малооблачных элементов M10 ( $F_{CLD} < 50\%$ ) будет практически линейно уменьшаться пропорционально величине  $F_{CLD}$  (рис. 5б).

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

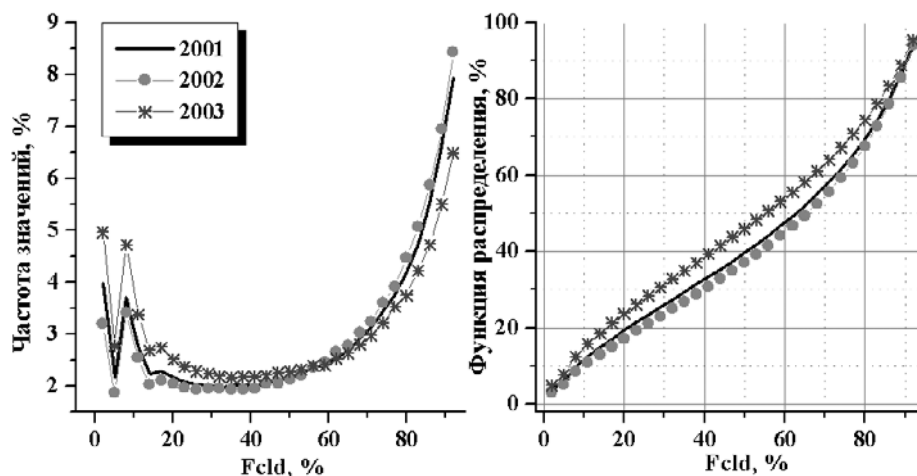


Рис. 5. Гистограммы (а) и функции распределения (б) значений  $F_{CLD}$ .

Как и в случае с АОТ, анализ пространственных усредненных за сезон значений  $S_{CLD}$  производился для 224 участков размером  $0.5^\circ$  по широте и  $1^\circ$  по долготе (масштаб пространственного усреднения порядка  $50 \times 50$  км). На рисунке 6 для 2001–2003 гг. представлены три карты  $S_{CLD}(x,y)$ . Анализ данных рис.6 позволяет сделать вывод о заметной пространственной вариабельности значений  $S_{CLD}$ . Так, диапазон максимальных различий этих данных составил величину порядка 12–18%, а значения СКО составляют диапазон 3–4%. При этом трудно указать вид закона распределения, соответствующий гистограммам значений  $S_{CLD}(x,y)$ . Анализируя карты  $S_{CLD}(x,y)$ , уже нельзя сделать выводы об их квазиоднородности или наличии схожих 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 для этой пространственной зоны региона мониторинг подстилающей поверхности из космоса будет менее эффективен за счет мешающей роли облачности.

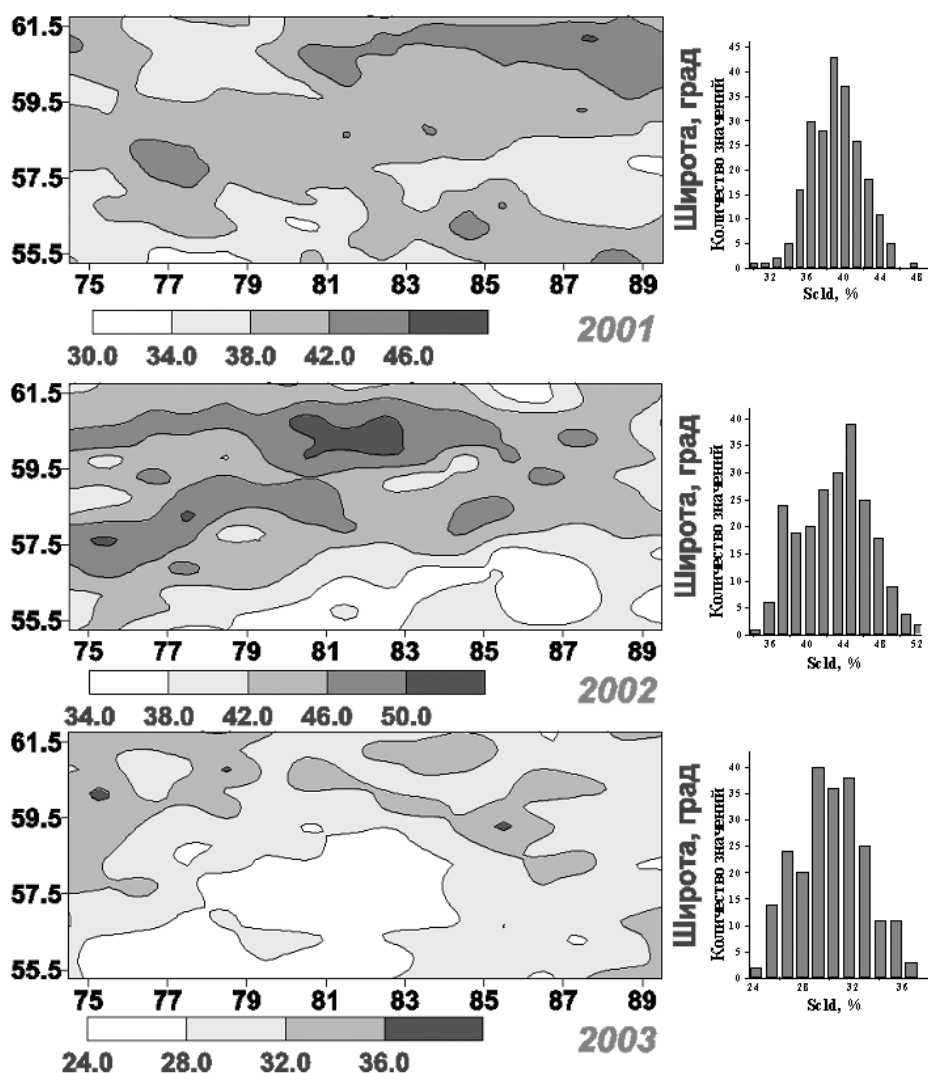


Рис. 6. Пространственные распределения усредненных за сезон значений  $S_{CLD}$  и их гистограммы.

### 3. Анализ результатов детектирования пожаров (MOD14)

Для изучения эффективности использования данных MODIS Fire Product в Томском регионе в этой работе были использованы 1610 гранул типа MOD14 за пожароопасный сезон 2003 года. В этих файлах содержатся данные о результатах детектирования высокотемпературных аномалий с помощью алгоритма [8,9]. Данные включают географические координаты “горячих” пикселей, значения спутниковых измерений в этих точках и их окрестностях, и другую информацию. В качестве объективных данных для тестирования MODIS Fires Product использовалась официальная информация Томских служб пожароохраны лесов о лесных пожарах, обнаруженных на территории области за период июнь-сентябрь 2003 года. Кроме того, был проведен сравнительный анализ данных MOD14 и результатов мониторинга лесных пожаров, регулярно проводимых ИОА СО РАН в Томской области на базе спутниковых измерений AVHRR/NOAA [11,12].

Комплексный анализ результативности спутниковых методов выполнен на основе изложенного в [11,12] подхода. Ниже приведем краткое описание его основных моментов.

А) При сравнении спутниковых данных с тестовой информацией используются следующие ключевые характеристики очагов: 1) географические координаты (широта и долгота), дополняемые азимутом и расстоянием от пожара до места базирования авиаотделения; 2) даты и время обнаружения ( $T_{Обн}$ ), локализации ( $T_{Лок}$ ) и ликвидации ( $T_{Лик}$ ) пожара; 3) площади пожара в момент его обнаружения ( $S_{Обн}$ ) и в момент его ликвидации ( $S_{Лик}$ ). Эти данные для пожаров 2003 года иллюстрируются рисунком 7.

В) С целью оценки эффективности раннего (по сравнению с наземными службами) обнаружения со спутников лесных пожаров временной интервал его существования [ $T_{Обн}$ ,  $T_{Лик}$ ] расширяется до величины [ $T_0$ ,  $T_{Лик}$ ], где  $T_0 = T_{Обн} - dT$  ( $dT$  зависит от  $S_{Обн}$ ).

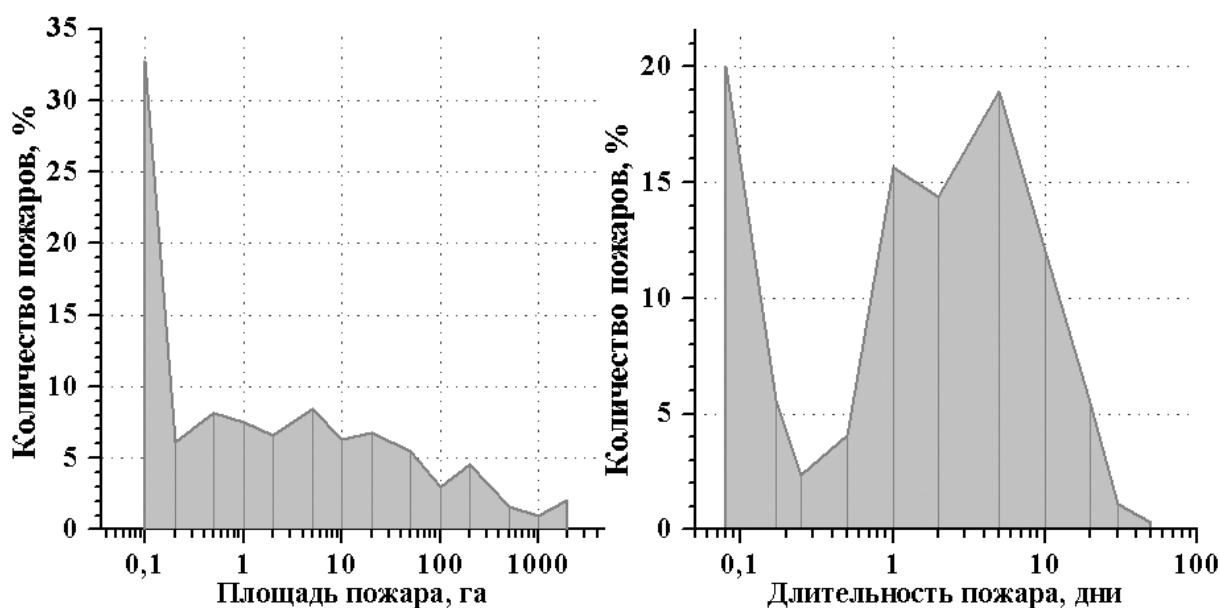


Рис. 7. Частотные распределения пожаров в зависимости от их площади и длительности (Томская область, 2003 год).

С) Для каждого спутникового снимка осуществляется следующая процедура:

1) составляется карта пространственного расположения обнаруженных со спутника высокотемпературных аномалий; 2) составляется карта пространственного расположения очагов пожаров, для которых время получения снимка попадало в интервал  $[T_0, T_{лик}]$ ; 3) производится сравнение двух карт, и по заданному пространственному критерию отбираются совпадающие пары объектов с учетом их пространственных размеров и вероятности присутствия очага на снимке, которая считается равной 1 в интервале  $[T_{обн}, T_{лок}]$  и стремится к нулю при  $T \rightarrow T_0$  или  $T \rightarrow T_{лик}$ .

Д) При оценках эффективности спутниковых методов учитывается тот факт, что для части очагов их обнаружение со спутника практически невозможно. Это связано со следующими причинами:

1) длительность пожара настолько мала, что интервал  $[T_{обн}, T_{лик}]$  лежит между моментами ближайших к данному интервалу сеансов мониторинга; 2) расстояние между очагами (пересекающимися по интервалам существования) составляет менее 2 км, т.е. они не могут быть пространственно разделены на снимках; 3) очаг закрыт плотной облачностью в течение всего временного интервала  $[T_{обн}, T_{лик}]$ .

Таблица 1. Результаты оценки эффективности детектирования пожаров из космоса (Томский регион).  
В скобках – результативность раннего обнаружения очагов.

	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Всего
<b>Кол-во пожаров</b>	<b>103</b>	<b>167</b>	<b>209</b>	<b>86</b>	<b>565</b>
<b>NOAA (ИОА)</b>	16 (7)	60 (22)	82 (37)	28 (11)	186 (77)
<i>MOD14</i>	7 (4)	28 (11)	53 (16)	10 (6)	98 (37)
<b>MOD14/ Terra</b>	6 (3)	20 (6)	43 (13)	9 (6)	78 (28)
<b>MOD14/ Aqua</b>	6 (4)	21 (7)	40 (8)	7 (4)	74 (23)

Результаты оценки для Томской области эффективности MODIS Fire Products (MOD14) и алгоритмов, используемых в ИОА СО РАН, приведены в таблице 1 и на рисунке 8. Анализ этих данных позволяет сделать вывод о том, что результативность данных MODIS Fire Products почти вдвое ниже по сравнению с данными ИОА СО РАН, особенно при обнаружении малоразмерных очагов низкой интенсивности.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект РФФИ № 04-07-90018).

*"The data used in this study were acquired as part of the NASA's Earth Science Enterprise. The algorithms were developed by the MODIS Science Teams. The data were processed by the MODIS Adaptive Processing System (MODAPS) and Goddard Distributed Active Archive Center (DAAC), and are archived and distributed by the Goddard DAAC."*

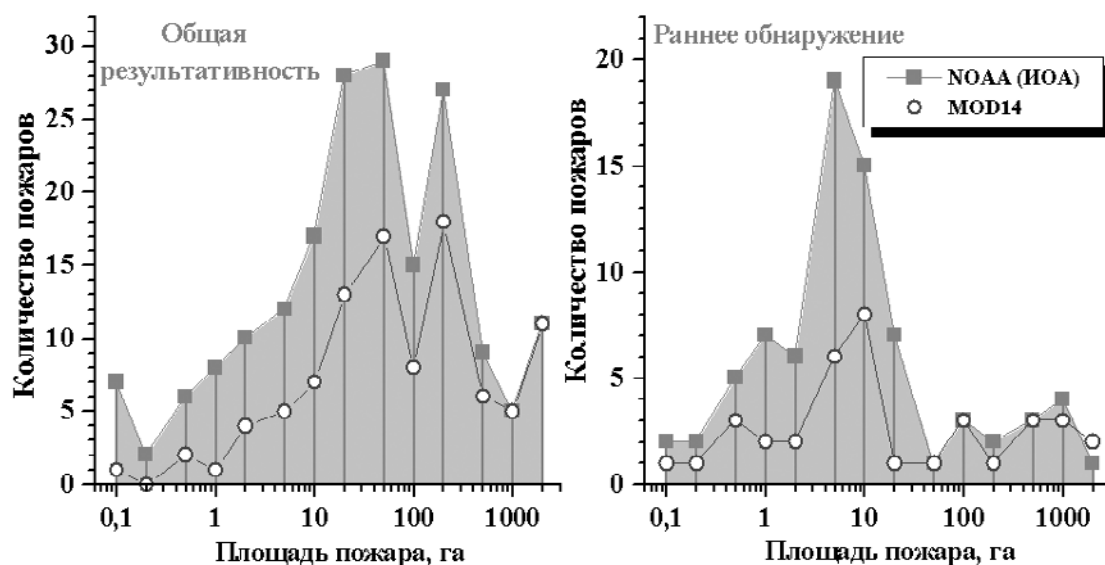


Рис. 8. Частотные распределения обнаруженных из космоса пожаров в зависимости от их площади (Томская область, 2003 год).

### Литература

1. Афонин С.В., Белов В.В. Анализ оптических условий космомониторинга лесных пожаров в Томском регионе // 5-я Международная конференция "Природные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия": Сборник тезисов. Томск: изд-во ТГУ. 2003. С.46-47.
2. 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": Symposium Abstracts. Tomsk: IAO SB RAS. 2003. P.95.
3. Афонин С.В., Белов В.В., Энгель М.В. Статистический анализ оптико-метеорологических параметров атмосферы Томского региона на основе спутниковых данных MODIS // Международный Симпозиум стран СНГ по Атмосферной Радиации «МСАР-04»: Тезисы докладов. Санкт-Петербург: изд-во СпбГУ. 2004. С.102-103.
4. 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> International Symposium "Atmospheric and ocean optics. Atmospheric physics": Symposium Abstracts. Tomsk: IAO SB RAS. 2004. P.103.
5. Афонин С.В., Белов В.В., Энгель М.В. Использование спутниковых данных MODIS Atmosphere Products. // Международная конференция по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды ENVIROMIS-2004: Тезисы докл. Томск: изд-во ГУ "Томский ЦНТИ". 2004. С.45-46.
6. 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 атмосферы и океана, 2005. Т.18. № 1-2. С.52-60.
7. 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 // Journal of Geophysical Research, 1997. V.102. P.17051-17068.
8. Kaufman Y. J., Justice C.O., Flynn L.P., Kendall J.D., Prins E.M., Ward D.E., Menzel W.P., and Setzer A.W. Potential global fire monitoring from EOS-MODIS // Journal of Geophysical Research, 1998. V.103. P.32215-32238.
9. Giglio L., Descloitres J., Justice C.O., Kaufman Y.J. An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS // Remote Sensing of Environment, 2003. V.83. P.273-282.
10. Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Турчинович С.А. Солнечный фотометр для научного мониторинга (аппаратура, методики, алгоритмы) // Оптика атмосферы и океана, 2001. Т.14. №12. С.1132-1169.
11. Афонин С.В., Белов В.В. Система космомониторинга лесных пожаров на территории Томской области. Часть 2. Оценка эффективности космомониторинга // Оптика атмосферы и океана, 2001. Т.14. №8. С.692-696.
12. Афонин С.В., Белов В.В. Эффективность применения спутниковых технологий для оперативного мониторинга лесных пожаров в Томской области // Исслед. Земли из космоса, 2002. № 1. С.42-50.