

*T.C. Ermakova, P.E. Vankevich, Y.L. Rudakova*

**ОЦЕНКА ТРЕХМЕРНОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО  
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЕЙ АЭРОЗОЛЯ  
В РАЙОНАХ ИНТЕНСИВНОГО ЗАДЫМЛЕНИЯ  
ОТ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ  
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИЗ КОСМОСА**

*T.S. Ermakova, R.E. Vankevych, Y.L. Rudakova*

**EVALUATION OF THREE-DIMENSIONAL SPATIAL FIELD  
DISTRIBUTION OF AEROSOL IN THE WILD-FIRE SMOKE  
AREAS ON THE BASIS OF REMOTE SENSING DATA**

*В работе представлены результаты оценки трехмерного пространственного распределения полей аэрозоля в районах интенсивного задымления от лесных пожаров на основе данных дистанционного зондирования из космоса. Использование восстановленных трехмерных полей концентрации аэрозоля в заданном регионе с высоким пространственным разрешением по данным спутникового зондирования атмосферы в приложении к оценке задымленности от пожаров производится впервые.*

*Ключевые слова: концентрация аэрозоля, выбросы от лесных пожаров, спутниковые данные, лесные пожары.*

*This article presents the results of a three-dimensional spatial field distribution of aerosol in the wild-fire smoke areas on the basis of remote sensing data. The use of reduced three-dimensional fields of aerosol concentration in a given region with high spatial resolution remote sensing data on the atmosphere in the annex to the assessment of smoke from the fires was made for the first time.*

*Key words: aerosol concentrations, wild-fire emissions, remote sensing data.*

## **Введение**

Тепловые и дымовые выбросы обширных лесных пожаров меняют динамику атмосферы, процессы циркуляции воздушных масс и, тем самым, погодные условия в отдельных регионах. Оперативные оценки концентрации в атмосфере аэрозолей от лесных пожаров, включая их подробное пространственно-временное распределение – актуальная проблема, которая в силу ограничений каждого из методов не может быть разрешена. При этом, высота подъема выбросов от лесных пожаров является определяющим фактором продолжительности атмосферного цикла, трансформации и влияния на перемещение загрязняющих воздух веществ.

Целью представляемых исследований является получение осредненного за неделю распределения аэрозоля в трехмерном пространстве с последующей верификацией эволюции полей примесей в моделях атмосферного переноса и химических трансформаций. Данный продукт должен нести информацию об общем распределении аэрозоля по вертикали и горизонтали, а также о верхней границе аэрозольного облака.

### **Методология**

Из числа представленных оперативных продуктов наибольший интерес для настоящего проекта представляют данные с инструментов MODIS и CALIPSO, входящих в состав американо-французской орбитальной группировки спутников A-train (подробная информация на <http://atrain.nasa.gov/>) на солнечно-синхронной орбите высотой 690 км и с углом наклона 98,2°. Спутники из A-train пролетают над одной и той же точкой земной поверхности с интервалом в несколько минут, что позволяет сформировать высокоточную трёхмерную картину атмосферы в зоне пролета. Спутники совершают вокруг Земли 14 витков в день. Спутник Aqua с инструментом MODIS пересекает европейскую часть России приблизительно в 13:00 по местному времени. Спутники в данном «поезде» находятся на расстоянии от нескольких секунд до нескольких минут друг от друга. Таким образом, есть возможность практически одновременно получать широкий спектр параметров, используемых в развитии наук о Земле.

### **MODIS**

Четвертым «вагоном» в этом поезде выступает спутник Aqua. Инструмент MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) на борту спутника Aqua измеряет излучение на 36 длинах волн, от 0,41 до 14 мкм. Полоса обзора сенсора длиной в 2330 км обеспечивает почти глобальное покрытие каждый день. Разные алгоритмы используются для получения измерений оптической плотности аэрозоля над поверхностью суши и водной поверхностью.

Над поверхностью суши оптическая плотность аэрозоля измеряется на следующих длинах волн: 0,47, 0,55, и 0,66 мкм [Kaufman, 1997]. Этот же алгоритм измерения используется и в прибрежных районах. Данные возможно получить только над темными поверхностями. Пиксели, содержащие снег/лед и облачные пиксели маскируются. После маскирования темные пиксели отбираются в зависимости от данных отражения с этих пикселей на 2,12 мкм длине волны. Далее пиксели сортируются в зависимости от значений отражательной способности на 0,66 мкм длине волны и 20% самых темных, а также 50% самых ярких внутри каждой десятикилометровой ячейки отбрасываются [Kittaka, 2011].

В исследовании использовались данные с инструмента MODIS, прошедшие предварительную обработку в процессинговом центре NASA, представленные в виде продукта 2-го уровня – MODIS Atmosphere Level 2 Joint Product. Данный продукт содержит целый спектр ключевых параметров, таких как аэрозоль, водяной пар, облако, профиль и маска облачности, которые были получены из стандартного комплекта продуктов второго уровня (рис. 1). Этот новый продукт был специально разработан, чтобы свести к минимуму передачу данных и требования к хранению, но при этом оставался достаточно ясным и полезным для пользователей. Научные базы данных, содержащиеся в этом продукте, охватывают полный набор наиболее интересных параметров, получаемых со спутника, и имеют пространственное разрешение в 5 и 10 км (в надире).

Данные по аэрозолям, облачной фазе и оптические параметры облаков доступны только в дневное время. В то время как водяной пар, верхняя граница облаков, облачная маска, отражение от перистых облаков и параметры профиля доступны как днем, так и ночью [<http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/JOINT/index.html>].

Аэрозольные алгоритмы MODIS используют мультиспектральное излучение наряду с углом рассеяния для того, чтобы определить тип аэрозоля и суммарную оптическую плотность [Remer, 2005]. Продукты пятой коллекции (collection 05) включают в себя следующие типы аэрозоля: растворимый в воде, влажная морская соль и пыль. Недавние усовершенствования в алгоритмах, теперь позволяют получать информацию о выбросах от пожаров даже в сложных условиях [Hsu, 2006].

Пятая коллекция продуктов оптической плотности аэрозоля с инструмента MODIS прошла тщательную проверку, и качество данных стало более понятным. Последовательный пролет CALOP и Aqua друг за другом делает возможным получение большого количества измерений аэрозоля, выполненных по всему земному шару практически одновременно обоими спутниками. Сравнение оптической плотности аэрозоля с инструментов MODIS и CALIOP позволяет уточнить информацию о качественном представлении профилей CALIOP [Remer, 2005; Kahn, 2007].

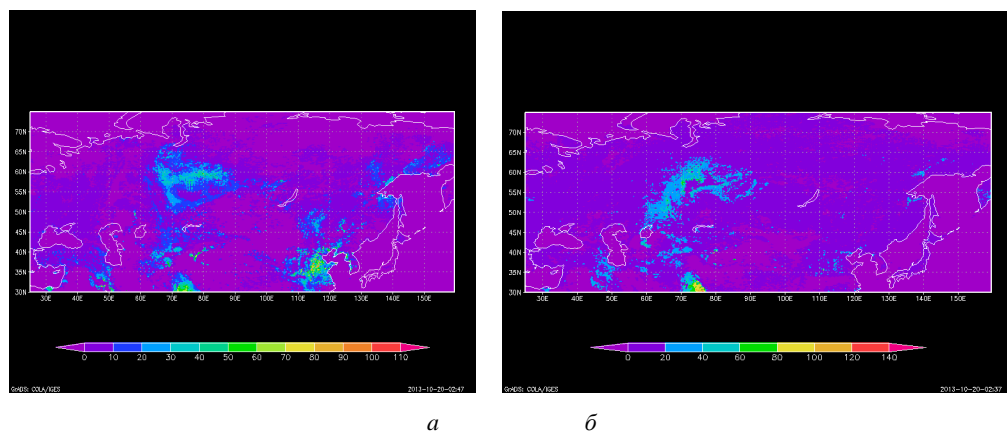


Рис. 1. Интегральная концентрация выбросов аэрозоля от лесных пожаров осредненная за неделю *а* – с 14 по 20 июня 2012 г., *б* – с 28 июня по 4 июля 2012 г.

### CALIPSO

Третьим в этой цепочке следует спутник CALIOP с инструментом CALIPSO на борту. CALIOP (Cloud-Aerosol LIdar with Orthogonal Polarization) – лидар с ортогональной поляризацией для наблюдения за облаками и аэрозолем. Прибор предназначен для получения вертикальных профилей при упругом рассеянии от слоя облаков в различное время суток, а также для описания распределения в нём водяных паров, аэрозолей и пыли.

Инструмент обеспечивает высокое вертикальное разрешение и позволяет получать информацию о профилях аэрозоля, находящегося выше облачности и ниже оптически тонких облаков, а также в безоблачных условиях. Спутник CALIOP действует с июня 2006 года и с того времени впервые появилась возможность получать многолетние записи аэрозоля в трехмерной виде [Winker, 2009].

CALIPSO – активный сенсор, который делает измерения атмосферных составляющих в определенном диапазоне. Ему не требуются предположения о вертикальном распределении и отражательной способности поверхности, которые являются фундаментальными для большинства пассивных измерений.

Несмотря на то что лидарные измерения обратного рассеяния не зависят от поверхностных эффектов, они страдают от необходимости определения аэрозольного отношение ослабления к обратному рассеянию (an aerosol extinction-to-backscatter ratio)  $Sa$  (так же называемое аэрозольно-лидарным отношением) для того, чтобы рассчитать ослабление от сигналов обратного рассеяния лидара. В зависимости от значения  $Sa$  на разных длинах волн (532 и 1064 нм) аэрозоль делят на следующие типы: пыль (в основном пыль с пустыни), загрязненный континентальный аэрозоль, загрязненная пыль (комбинация пустынной пыли и выбросов от лесных пожаров), дым (выбросы от лесных пожаров), чистый континентальный аэрозоль (так называемый фоновый аэрозоль), чистый морской аэрозоль [Omar, 2009].

Данные по оптической плотности аэрозоля, полученные с MODIS-Aqua, представляют собой двумерное поле, интегрированное по высоте, однако эти данные можно сопоставить с данными CALIOP по дневным профилям экстинкции аэрозоля (рис. 2).

Значения коэффициентов экстинкции получают в три этапа [Winker, 2009]:

- находятся профили обратного рассеяния послойно, с горизонтальным осреднением от 1/3 км до 80 км;
- Идентифицированные слои классифицируются как облака или аэрозоли;
- извлекаются данные о профилях экстинкции, начиная с самых верхних полученных слоев и двигаясь по направлению к земной поверхности.

Извлеченные данные по аэрозолям дальше представляются в виде слоев горизонтально осредненных по 5 км, 20 км или 80 км. Конечные результаты представлены на пятикилометровой горизонтальной шкале в продукте с названием – 5-km Aerosol Layer Product. Результаты 20-км и 80-км слоев повторяются по 4 и 8 раз соответственно в данном продукте.

Данные экстинкции, полученные из упругого обратного рассеяния лидара, такого как CALIOP, недооценены и необходимо дополнительное ограничение. В том случае, когда имеется приподнятый слой аэрозоля, то есть над и под этим слоем только чистый воздух, коэффициент пропускания через этот слой может быть выведен из сигналов чистого воздуха по обе стороны этого слоя [Young, 1995]. Если отношение сигнал/шум этих сигналов чистого воздуха достаточно

высоко, тогда измеренный сигнал пропускания может быть использован как необходимое ограничение для данных экстинкции. Для CALIOP отношение сигнал/шум при ясном небе редко бывает достаточно высоким в дневное время (за счет солнечного фона), что делает невозможным применение такой методики. Следовательно, для получения дневных данных необходимо использовать алгоритм для оценки «лидарного отношения» (отношение экстинкции частицы к 180-градусному обратному рассеянию) из данных обратного рассеяния на длине волны 0,532 мкм и деполяризованных сигналов, что обеспечит необходимое ограничение для данных по экстинкции [Omar, 2009]. Данные по экстинкции аэрозоля извлекаются из слоев над облачным покровом и ниже оптически тонких облаков, так же как и в безоблачных столбцах, но только внутри идентифицированных аэрозольных слоев [Young, 2009].

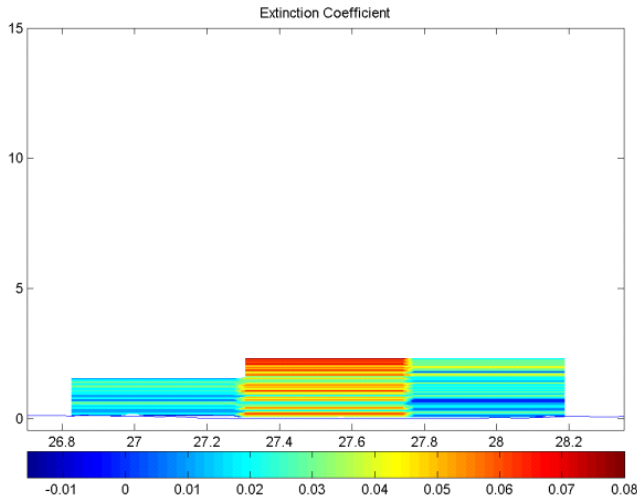


Рис. 2. Профиль аэрозольной экстинкции по данным CALIPSO.  
Тонкой голубой линией обозначена высота поверхности

В данной работе расчетные трехмерные поля концентраций аэрозоля получаются на основе синергии спутниковых данных, содержащих информацию о вертикальных профилях сканирования атмосферы («профили») с данными панорамной съемки, представляющие собой двумерные «слои» интегральных по всей толще атмосферы данных.

«Профили» состоят из последовательности импульсов в вертикальном направлении, отображаемых на двумерной плоскости, где ось  $x$  – (горизонтальная) линия проекции лучей на поверхность Земли, а ось  $y$  – (вертикальная) высота. Линейность лучей подразумевает линейность времени, так как импульсы испускаются с постоянной частотой в 20,16 Гц для CALIOP. Так как спутниковый «поезд» путешествует с приблизительно постоянной скоростью в 7 км/с,

ось  $x$  также линейна относительно пройденного расстояния. Вследствие того, что импульсы не излучаются на регулярных высотах, точки с данными должны быть проинтерполированы на регулярную сетку. Это делается интерполяцией с округлением (до ближайшего соседнего).

После процедуры регуляризации на сетке, данные о вертикальном распределении коэффициента экстинкции отфильтровывались на основе процедуры статистического анализа. Конечной целью преобразования профиля экстинкции являлось уменьшение зашумленности данных.

Трехмерное поле массовой концентрации аэрозоля восстанавливалось путем распределения двумерного поля массовых концентраций, определенных по формулам (4.1.26)–(4.1.27) из данных MODIS, по 20 вертикальным слоям (толщина слоя 500 м) в соответствии с приведенным к безразмерному виду профилями CALIPSO. Пример горизонтального и вертикального распределения поля аэрозоля приведен на рис. 3.

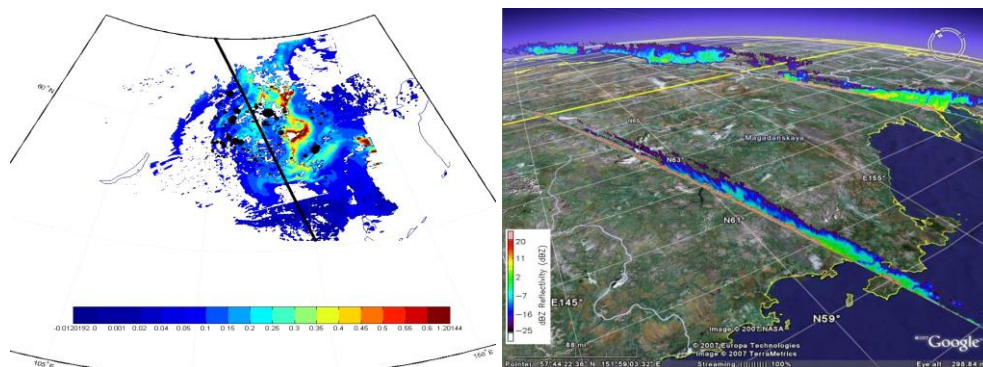


Рис. 3. Распределение аэрозольной оптической плотности по данным MODIS, где черной линией обозначен пролет CALIPSO, а черными точками – горящие лесные пожары; чем больше точка, тем интенсивнее идет горение (слева); вертикальное распределение аэрозольной оптической плотности по данным CALIPSO (справа)

Результирующие поля спроецированы на регулярную сеточную область, таким образом, сформирован 4х мерный цифровой массив, отражающий эволюцию осредненных за 7 дней полей трехмерного распределения аэрозоля над территорией РФ.

### Заключение

По результатам проведенных работ создана база данных очагов возгорания, спутниковых профилей концентраций аэрозоля трехмерных полей концентраций аэрозоля за 2006–2012 гг. на территории РФ. База данных представляет собой регуляризованные цифровые массивы на сеточной области с пространственным разрешением  $10 \times 10$  км, вертикальным разрешением 100 м, спутниковых профилей и полей интегральных концентраций аэрозоля, а также восста-

новленных на их основе трехмерных полей концентраций аэрозоля за 2006–2012 гг. на территории Российской Федерации (рис. 4).

Построены зависимости величины аномалии ТПО от скорости ветра. Показано, что для рассмотренных случаев аномалии ТПО зависят не только от скорости ветра, но и от градиента температуры в термоклине.

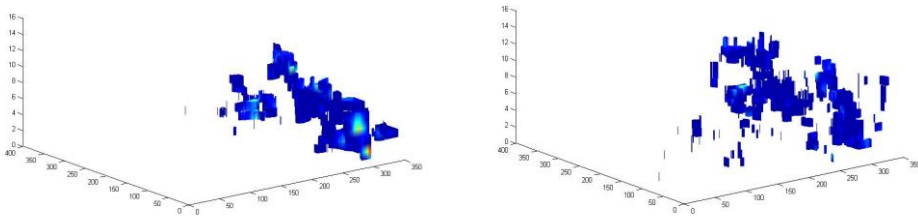


Рис. 4. Трехмерное поле выбросов от лесных пожаров, осредненное за неделю. Московская область, 2010 г., слева – с 29 июля по 4 августа, справа – с 6 по 12 августа

Проведенный анализ показал перспективность комбинирования данных пассивных (инфракрасных измерений) с измерениями активных сканирующих систем для более точного определения типа, микрофизических свойств и происхождения аэрозольных частиц для двумерных интегральных полей систем пассивной панорамной съемки. В свою очередь статистический анализ собранного многолетнего массива данных совмещенных в пространстве измерений MODIS и CALIPSO существенно облегчает интерпретацию данных CALIPSO о вертикальном распределении аэрозоля в атмосфере.

В то же время следует отметить, что между различными спутниковыми данными существуют серьезные несогласованности, которые связаны с разрешением датчика, частотой наблюдения и временем пролета, спектральными свойствами датчиков, и недостатками алгоритмов дешифровки. Ожидается, что указанные несогласованности будут частично разрешены за счет ассимиляции полученных данных в физически корректную модель эволюции атмосферного аэрозоля.

### Литература

- Hsu, N. C., S. C. Tsay, M. D. King, and J. R. Herman, 2006: Deep blue retrievals of Asian aerosol properties during ACE-Asia. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 44, 3180–3195.*
- Kahn, R. A., Garay, M. J., Nelson, D. L., Yau, K. K., Bull, M. A., Gaitley, B. J., Martonchik, J. V., and Levy, R. C.: Satellite-derived aerosol optical depth over dark water from MISR and MODIS: Comparisons with AERONET and implications for climatological studies, J. Geophys. Res., 112, D18205, doi:10.1029/2006JD008175, 2007.*
- Kaufman, Y. J., Tanr'e, 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., 102, 17051–17067, 1997.*
- Kittaka, C., Winker, D. M., Vaughan, M. A., Omar, A., and Remer, L. A.: Intercomparison of column aerosol optical depths from CALIPSO and MODIS-Aqua, Atmos. Meas. Tech., 4, 131–141, <http://dx.doi.org/10.5194/amt-4-131-2011>doi:10.5194/amt-4-131-2011, 2011.*

- Omar, A., Winker, D., Kittaka, C., Vaughan, M., Liu, Z., Hu, Y., Trepte, C., Rogers, R., Ferrare, R., Kuehn, R., and Hostetler, C.:* The CALIPSO Automated Aerosol Classification and Lidar Ratio Selection Algorithm, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 26, 1994–2014, doi:10.1175/2009JTECHA1231.1, 2009.
- Remer, L. A., and Coauthors,* 2005: The MODIS aerosol algorithm, products, and validation. *J. Atmos. Sci.*, 62, 947–973.
- Winker, D.M., Vaughan, M.A., Omar, A., Hu, Y., Powell, K. A., Liu, Z., Hunt, W. H., and Young, S.A.:* Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 26, 2310–2323, doi:10.1175/2009JTECHA1281, 2009.
- Young, S.A.:* Analysis of lidar backscatter profiles in optically thin clouds, *Appl. Optics*, 34, 7019–7031, 1995.
- Young, S. A. and Vaughan, M.A.:* The retrieval of profiles of particulate extinction from Cloud Aerosol Lidar Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO) data: Algorithm description, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 26, 1105–1119, doi:10.1175/2008JTECHA 1221.1, 2009.

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.3.1 федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (Соглашение №14.В37.21.1528 от 01 октября 2012 года).