

М. С. Васильев

Сравнительный анализ оптически активных компонент атмосферы по данным дистанционного зондирования над Центральной Якутией

ФГБУН Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
г. Якутск, Россия

Аннотация. Рассматриваются параметры оптически активных компонент атмосферы: аэрозольная оптическая толщина (AOT) и интегральное влагосодержание атмосферы (W), полученные методами дистанционного зондирования. Используются данные солнечного фотометра глобальной международной сети AERONET, спутникового мониторинга (MODIS/Terra, Aqua) и реанализа ERA-Interim. Солнечный фотометр марки CIMEL CE-318 расположен в ~50 км к юго-западу от г. Якутска на полигоне «Широкие атмосферные ливни» (ШАЛ) ИКФИА СО РАН (с. Октёмцы). Данные реанализа основаны на регулярных метеорологических наблюдениях, аэрологической и спутниковой информации. Были использованы «ячейки» среднемесячных значений реанализа и спектрорадиометра MODIS с широтно-долготным разрешением $0,125^\circ \times 0,125^\circ$ и $1 \times 1^\circ$, соответственно вокруг солнечного фотометра. Проведен сравнительный анализ между данными дистанционного зондирования с использованием расчетов коэффициентов корреляции и максимальной погрешности измерения AOT&W солнечным фотометром. Для построения пространственно-временных карт AOT над территорией Якутии использованы программный пакет SMPAS и геоинформационный продукт ArcView. Показано, что полученная с помощью реанализа и спутникового мониторинга информация о параметрах оптически активных компонент атмосферы (AOT, W) достаточно хорошо отображает временную изменчивость относительно солнечного фотометра. На обширной территории Якутии при отсутствии данных AOT и W, полученных на основе солнечных фотометров сети AERONET, применение реанализа и спутникового мониторинга можно считать целесообразным. Однако стоит отметить, что использование данных MODIS/Terra, Aqua над рассматриваемым регионом обосновано лишь в бесснежный период, так как над снежной поверхностью отмечаются наибольшие погрешности в определении AOT. Таким образом, на территории Якутии необходимо установить сеть экспериментальных приборов и установок для осуществления непрерывного (с «полной автоматизацией») мониторинга за оптически активными компонентами атмосферы.

ВАСИЛЬЕВ Михаил Семенович – м. н. с. ФГБУН Института космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН.

E-mail: m.s.vasiliev@ikfia.ysn.ru

VASILIEV Mikhail Semenovich – Junior Researcher Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy Siberian Branch Russian Academy of Sciences.

Ключевые слова: аэрозольная оптическая толщина, интегральное влагосодержание атмосферы, реанализ, спутниковый мониторинг, солнечный фотометр, мониторинг атмосферных параметров, климат, корреляционный анализ, солнечная радиация, Центральная Якутия.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 18-45-140033 p_a).

DOI 10.25587/SVFU.2018.64.12136

M. S. Vasiliev

Comparative Analysis of Optical Active Components of the Atmosphere from Remote Sensing Data Over Central Yakutia

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and
Aeronomy Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

Abstract. Parameters of optically active components of the atmosphere-aerosol optical depth (AOD) and integral moisture content of the atmosphere (W) obtained by remote sensing methods are considered in the work. The data of the Sun-Sky photometer of the global international network AERONET, satellite monitoring (MODIS/Terra, Aqua) and reanalysis of ERA-Interim are used. The Sun-Sky photometer CIMEL CE-318 is located ~50 km south-west of Yakutsk on the range of “Extensive air showers” of the ShICRA of SB RAS (Oktyomtsy village), and the reanalysis data are based on regular meteorological observations, aerological and satellite information. The “cells” of the monthly average values of the reanalysis and the MODIS spectroradiometer with a latitude-longitude resolution of $0,125 \times 0,125^\circ$ and $1 \times 1^\circ$, respectively around the solar photometer, were used. A comparative analysis was carried out between the remote sensing data using the calculation of correlation coefficients and the maximum error of AOD&W measurement by a Sun-Sky photometer. To build space-time AOD maps over the territory of Yakutia, the software package CMPAS and the geoinformation product ArcView are used. It is shown that the information on the parameters of the optically active components of the atmosphere (AOD, W) obtained with the help of reanalysis and satellite monitoring well reflects temporal variability relative to the Sun-Sky photometer. In the vast territory of Yakutia in the absence of AOD and W data, obtained from Sun-Sky photometers of the AERONET network, the application of reanalysis and satellite monitoring can be considered expedient. However, it should be noted that the using of data MODIS/Terra, Aqua over the region under consideration is justified only in the period without snow, since the snow surface is marked by the greatest errors in the determination of AOD. Thus, in the territory of Yakutia, a network of experimental instruments and installations is needed to carry out a continuous (with “full automatization”) monitoring of the optically active components of the atmosphere.

Keywords: aerosol optical depth, integral atmosphere moisture content, reanalysis, satellite monitoring, Sun-Sky photometer, atmospheric parameters monitoring, climate, correlation analysis, solar radiation, Central Yakutia.

The project was conducted with financial support from RFBR (grant # 18-45-140033 r_a).

Введение

Известно, что одной из важнейших задач климатологии является изучение оптически активных компонентов атмосферы, определяющих поглощение, рассеивание и пропускание как солнечного, так и теплового излучения Земли. Параметры атмосферного аэрозоля (например, АОТ) и водяного пара – это климатообразующие факторы, которые недостаточно изучены на обширных территориях (например, в Якутии), что связано в основном с отсутствием сети экспериментальных приборов [1, 2]. Атмосферный аэрозоль в отличие от парниковых газов имеет многообразие свойств и взаимодействий с солнечной радиацией и другими физическими полями, а также компонентами биосферы. Например, аэрозоль и его климатическое радиационное возмущающее воздействие

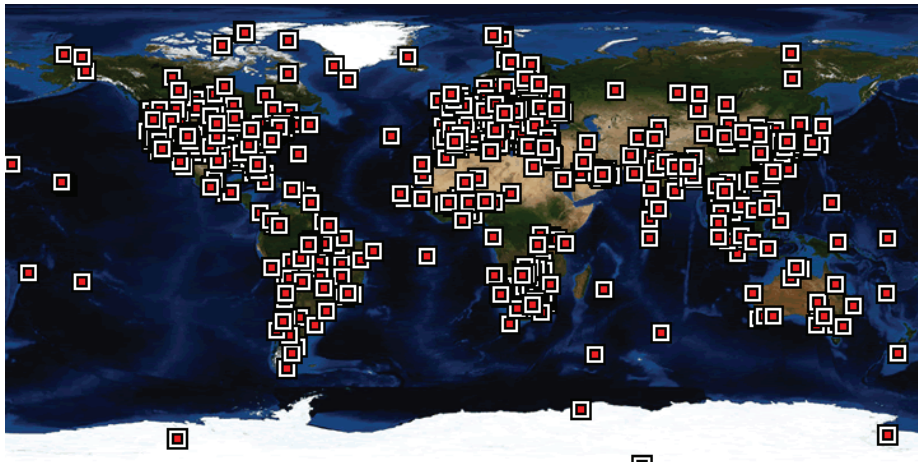


Рис. 1. Схема размещения пунктов мониторинга за оптическими параметрами атмосферы сети AERONET (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>) по состоянию на 2017 г.

могут как усиливать, так и ослаблять парниковый эффект. В свою очередь известно, что исследования, связанные с водяным паром, позволяют учесть энергетические ресурсы атмосферы, их оценка важна при решении задач по активным воздействиям на циклоны [3]. С процессами влагообмена связано образование облачного покрова и выпадение осадков [4].

Стоит отметить, что в настоящее время эффективным методом регулярных сетевых наблюдений за оптическими параметрами атмосферы (АОТ, W и озона) является солнечная фотометрия атмосферы. Например, глобальная международная сеть пунктов мониторинга АЭРОНЕТ (AERONET – AErosol RObotic NETwork, <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>) [5] имеет наибольший географический охват. Сеть пунктов мониторинга за оптическими параметрами атмосферы AERONET создана и поддерживается Центром космических полетов им. Годдарда (США, НАСА). Пункты мониторинга сети AERONET представлены на рис. 1, два из которых расположены на территории Якутии – ст. Якутск (61° с.ш., 129° в.д.) и ст. Тикси (71° с.ш., 128° в.д.).

Пункт мониторинга ст. Тикси (AERONET) находится в ведении Росгидромета (www.meteorf.ru) и расположен в районе метеорологической обсерватории «Тикси». Мониторинг атмосферных параметров на ст. Якутск осуществляется с помощью солнечного фотометра марки CIMEL CE-318 (ИКФИА СО РАН, <http://ikfia.ysn.ru/>), который расположен в ~ 50 км к юго-западу от г. Якутска на полигоне «Широкие атмосферные ливни (ШАЛ)» (с. Октёмцы) [6, 7]. В ведении ИКФИА также находится солнечный фотометр марки SP-9 производства ИОА СО РАН (г. Томск, <http://iao.ru/>), который расположен на крыше здания института.

В настоящей работе проведен сравнительный анализ АОТ и W в Центральной Якутии по данным реанализа, спутниковой и наземной информации.

Описание приборов и материалы исследования

В настоящее время в ведении ИКФИА находятся два солнечных фотометра – CIMEL CE-318 и SP-9 (рис. 2).

Роботизированный солнечный фотометр (Sun-Sky radiometer) CE-318 французской фирмы CIMEL (www.cimel.fr) измеряет прямую солнечную радиацию в восьми спектральных каналах (0,34, 0,38, 0,44, 0,50, 0,67, 0,87, 0,94 и 1,02 мкм) с периодичностью до 4 раз в час в зависимости от высоты Солнца. Канал 940 нм используется для определения насыщенности атмосферы водяным паром. АОТ вычисляется, исходя из спектрального ослабления луча на каждой длине волны, при помощи закона Бугера.



Рис. 2 (а, б). Вид и расположение солнечного фотометра марки CIMEL CE-318 на полигоне «ШАЛ» ИКФИА (а) и SP-9 на крыше здания института в г. Якутске (б)

Метод Бугера [8-11] основан на измерении прямого солнечного излучения с целью последующего определения АОТ атмосферы и общего содержания некоторых газов. Можно также выделить метод индикатрисы [12-14], заключающийся в измерении угловых распределений рассеянного излучения (яркости неба) для определения индикатрисы аэрозольного рассеяния. К недостаткам этих методов можно отнести ограничение их реализации в условиях облачности. Например, метод Бугера может применяться при частичной облачности (диск Солнца не должен быть закрыт облаками), а реализация метода индикатрисы возможна только в условиях безоблачного неба.

Фотометр SP-9 предназначен для измерений спектральной прозрачности атмосферы с целью последующего определения АОТ и W . Процесс измерений полностью автоматизирован и выполняется без участия оператора. Результаты измерений спектральной солнечной радиации (вместе с координатами и временем замеров) накапливаются в цифровом виде во flash-памяти прибора и затем передаются на персональный компьютер для последующей обработки и анализа. Определение искомым характеристик атмосферы основывается на методе «прозрачности» – фотометрировании прямого солнечного излучения, прошедшего через атмосферу, и дифференциальной методике [15]. При нормальных условиях эксплуатации и калибровочных данных погрешность определения составляет 0,01-0,02 и ~ 0.1 г/см², соответственно для АОТ и W .

В данной работе для проведения сравнительного анализа АОТ и W с данными солнечного фотометра CE-318 использована база данных реанализа ERA-Interim [16]. ERA-Interim использует модель ECMWF CY29R1 с 6-часовым шагом по времени, горизонтальным разрешением 50 км и вертикальным разрешением 60 слоев. Были использованы «ячейки», содержащие среднемесячные значения W , с широтно-долготным разрешением $0,125^\circ \times 0,125^\circ$ вокруг локальной станции наблюдения (AERONET, ст. Якутск).

Были привлечены данные спутникового мониторинга АОТ, полученные на основе спектро радиометра MODIS (the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Прибор установлен на спутниках серии «Terra» и «Aqua». Использован продукт обработки данных среднемесячных значений АОТ MOD08_M3 (Terra) и MYD08_M3 (Aqua) третьего уровня коллекции 6, $\lambda = 550$ нм [17].

Результаты сравнительного анализа АОТ и W

На рис. 3 представлен сезонный ход W по данным ст. Якутск и ERA-Interim реанализа за период 2004-2015 гг.

В целом (рис. 3) данные реанализа достаточно хорошо отображают сезонную изменчивость W . Значения W между реанализом и локальной станцией наблюдения

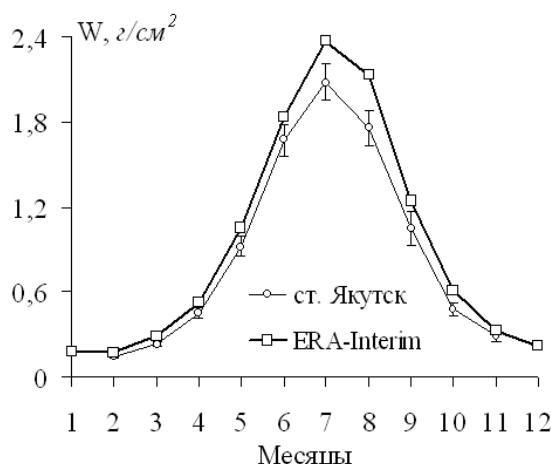


Рис. 3. Сезонный ход W по данным ст. Якутск (AERONET) и ERA-Interim ре-анализа за период 2004-2015 гг. [7]

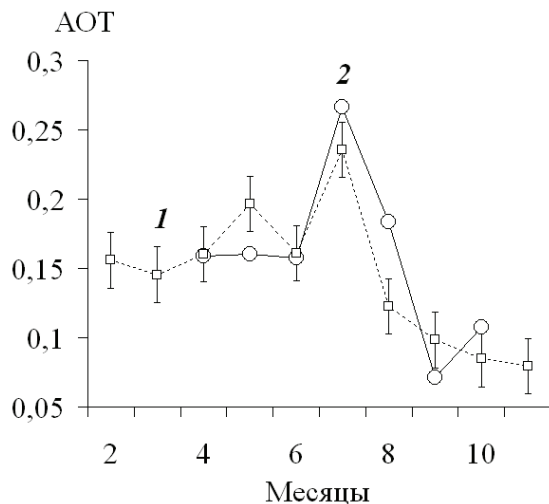


Рис. 4. Сезонный ход AOT по данным ст. Якутск (AERONET) и MODIS за период 2004-2014 гг., где 1 – данные CIMEL CE-318, 2 – MODIS/Terra, Aqua

(ст. Якутск) находятся в пределах среднего квадратического отклонения среднего арифметического значения (S_x) результатов измерений, полученных солнечным фотометром. Однако максимальное расхождение между данными наблюдается в летний период, но несмотря на это, коэффициент корреляции Пирсона R (уровень значимости $P = 99\%$ при критическом значении $t_{крит} = 0,71$) между данными ERA-Interim и ст. Якутск в сезонном ходе W за период 2004-2015 гг. составил 0,99.

Сезонный ход AOT по данным ст. Якутск и MODIS за период 2004-2014 гг. представлен на рис. 4. Использовались спутниковые данные с «ячейкой» $1 \times 1^\circ$ вокруг локальной станции наблюдения AOT.

Видно (рис. 4), что вариации AOT по результатам наземных и спутниковых наблюдений (без учета нормирования данных и разных факторов: технической неисправности, влияния облачности и снежного покрова – при определении AOT по данным MODIS и т. п.) за период апрель-октябрь идентичны. В целом абсолютные разли-

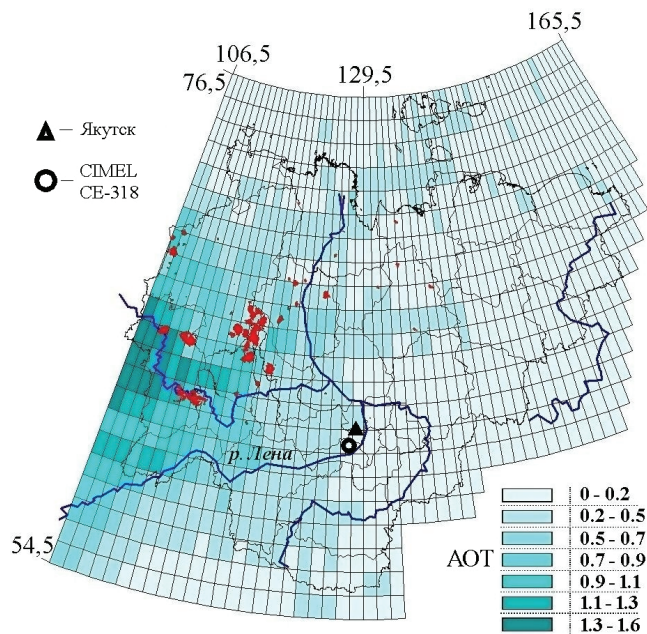


Рис. 5. Карта распределения АОТ над территорией Якутии с широтно-долготным разрешением 1о и очагов горения лесного массива (точки красного цвета) в августе 2013 г. по данным MODIS/Terra, Aqua

чия значений АОТ, полученных разными способами, находятся в пределах максимальной погрешности определения АОТ солнечным фотометром (порядка $\pm 0,02$). Большие расхождения между данными наблюдаются в мае и августе, они связаны с отсутствием данных CIMEL CE-318 в мае 2006 г. и с малым числом сеансов наблюдения в августе 2012 г. Отсутствие данных MODIS в ноябре-марте обусловлено большей погрешностью определения АОТ над снежной поверхностью [17].

Для построения пространственно-временных карт распределения АОТ с разрешением $1 \times 1^\circ$ вокруг над Якутией по данным MODIS были использованы программный пакет «Cloud Map Processing Script (CMPAS)» [18] и геоинформационный продукт ArcView. Для примера на рис. 5 представлена карта распределения АОТ над территорией Якутии и очагов горения лесного массива в августе 2013 г. Как видно, в западной и юго-западной частях Якутии наблюдаются наибольшие значения АОТ ($>0,7$). Увеличение АОТ может быть связано с наличием дымового аэрозоля, так как спутниковый мониторинг в то же время детектировал очаги горения лесного массива.

Заключение

Таким образом, в работе проведен сравнительный анализ АОТ и W между данными дистанционного зондирования. Получены следующие результаты:

- информация, полученная с помощью реанализа и спутникового мониторинга, достаточно хорошо отображает временную изменчивость относительно солнечного фотометра;

- в сезонном ходе W за период 2004-2015 гг. коэффициент корреляции Пирсона R с уровнем значимости $P = 99\%$ при критическом значении $g_{crit} = 0,71$ между данными ERA-Interim и ст. Якутск составил 0,99;

- результат сопоставления данных MODIS/Terra, Aqua и CIMEL CE-318 за период 2004-2014 гг. указывает на то, что абсолютные значения АОТ в целом находятся в пределах максимальной погрешности определения АОТ солнечным фотометром (порядка $\pm 0,02$).

На обширной территории Якутии при отсутствии данных АОТ и W , полученных на основе солнечных фотометров сети AERONET, применение реанализа и спутникового мониторинга можно считать целесообразным. Однако стоит отметить, что использование данных MODIS/Terra, Aqua над рассматриваемым регионом обосновано лишь в бесснежный период, так как над снежной поверхностью отмечаются наибольшие погрешности в определении АОТ.

Полученные результаты, данные реанализа и спутникового мониторинга планируется использовать для дальнейшего исследования влияния антропогенных источников аэрозоля на его общее содержание в атмосфере над регионом Северо-Востока России (Якутия).

Л и т е р а т у р а

1. Васильев М. С., Николашкин С. В., Каримов Р. Р. Сравнение приземной температуры воздуха в Якутии по данным реанализа и наземных наблюдений // Вестник СВФУ. – 2014. – Т. 11, № 5. – С. 82-88.
2. Vasiliev M. S., Nikolashkin S. V., Boroyev R. N. Atmospheric Transparency over Central Yakutia from the Sun Photometer Data in 2004-2014 // Russian Meteorology and Hydrology. – 2017. – Vol. 42, № 11. – Pp. 700-704.
3. Калинин Н. А., Ветров А. Л. Генерация доступной потенциальной энергии вследствие крупномасштабной конденсации в циклонах умеренных широт // Метеорология и гидрология. – 2002. – № 4. – С. 17-27.
4. Семенова А. П. К вопросу о связи осадков с влагосодержанием атмосферы / А. П. Семенова // Труды УкрНИГМИ. – 1982. – Вып. 188. – С. 14-17.
5. Holben B. N. et. el. AERONET – a federation instrument network and data archive for aerosol characterization // Remote Sens. Environ. – 1998. – Vol. 66, № 1. – Pp. 1-16.
6. Васильев М. С., Николашкин С. В. Температурный эффект дымового аэрозоля в летний сезон над центральной частью Якутии за период 2004-2014 гг. // Оптика атмосферы и океана. – 2015. – Т. 28, № 12. – С. 1106-1111.
7. Васильев М. С., Николашкин С. В. Связь широтной динамики влагосодержания атмосферы с квазидвухлетними колебаниями зонального ветра в экваториальной стратосфере и солнечной активностью над северо-востоком Евразии за период 1979-2015 гг. // Оптика атмосферы и океана. – 2017. – Т. 30, № 5. – С. 409-413.
8. Гущин Г. П. Методы, приборы и результаты измерения спектральной прозрачности атмосферы. – Л.: Гидрометеоздат. – 1988. – 200 с.
9. Баргенева О. Д., Никитинская Н. В., Сакунов Г. Г., Веселова Л. К. Прозрачность толщи атмосферы в видимой и ближней ИК-области спектра. – Л.: Гидрометеоздат. – 1991. – 224 с.
10. Shaw G. E., Reagan J. A., Herman B. M. Investigation of atmospheric extinction using direct solar radiation measurements made with a multiple wavelength radiometer // J. Appl. Met. – 1973. – Vol. 12. – Pp. 374-380.
11. Сивков С. И. Методы расчета характеристик солнечной радиации. – Л.: Гидрометеоздат. – 1968. – 232 с.
12. Пясковская-Фесенкова Е. В. Исследование рассеяния света в земной атмосфере. – М.: Изд-во АН СССР. – 1957. – 220 с.
13. Антюфеев В. С., Иванов А. И., Лившиц Г. Ш., Михайлов Г. А. Определение аэрозольных индикатрис рассеяния безоблачной атмосферы в спектральной области 0,55–2,4 мкм // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. – 1980. – Т. 16, № 2. – С. 146-154.
14. Смеркалов В. А. Прикладная оптика атмосферы / В. А. Смеркалов. – СПб.: Гидрометеоздат. – 1997. – 334 с.
15. Кабанов Д. М., Сакерин С. М. О методике определения аэрозольной оптической толщи атмосферы в ближнем ИК диапазоне спектра // Оптика атмосферы и океана. – 1997. – Т. 10, № 8. – С. 866-875.
16. ECMWF Newsletter N 110 – Winter 2006/07 / Ed. by B. Riddaway. European Center for Medium Range Weather Forecast. – 2007. – P. 53.

17. Levy R. C., Mattoo S., Munchak L. A., et al. The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean. – *Atmos. Meas. Tech.* – 2013. – № 6. – Pp. 2989-3034, doi: 10.5194/amt-6-2989-2013.

18. Соловьев В. С., Васильев М. С. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 20126103912 Cloud Map Processing Script (CMPAS), выдано Федеральной службой по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам (Роспатент) 10 января 2012 г. Правообладатель: Учреждение Российской академии наук Институт космофизических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН.

References

1. Vasil'ev M. S., Nikolashkin S. V., Karimov R. R. Svrnvenie prizemnoi temperatury vozdukha v Iakutii po dannym reanaliza i nazemnykh nabludeniim // *Vestnik SVFU.* – 2014. – Т. 11, № 5. – S. 82-88.

2. Vasiliev M. S., Nikolashkin S. V., Boroyev R. N. Atmospheric Transparency over Central Yakutia from the Sun Photometer Data in 2004-2014 // *Russian Meteorology and Hydrology.* – 2017. – Vol. 42, № 11. – Pp. 700-704.

3. Kalinin N. A., Vetrov A. L. Generatsiia dostupnoi potentsial'noi energii vsledstvie krupnomasshtabnoi kondensatsii v tsiklonakh umerennykh shirot // *Meteorologiya i gidrologiya.* – 2002. – № 4. – S. 17-27.

4. Semenova A. P. K voprosu o svyazi osadkov s vlagosoderzhaniiem atmosfery / A. P. Semenova // *Trudy UkrNIGMI.* – 1982. – Vyp. 188. – S. 14-17.

5. Holben B. N. et. el. AERONET – a federation instrument network and data archive for aerosol characterization // *Remote Sens. Environ.* – 1998. – Vol. 66, № 1. – Pp. 1-16.

6. Vasil'ev M. S., Nikolashkin S. V. Temperaturnyi effekt dymovogo aerozolia v letnii sezon nad tsentral'noi chast'iu Iakutii za period 2004-2014 gg. // *Optika atmosfery i okeana.* – 2015. – Т. 28, № 12. – S. 1106-1111.

7. Vasil'ev M. S., Nikolashkin S. V. Sviaz' shirotnoi dinamiki vlagosoderzhaniiia atmosfery s kvazidvukhletnimi kolebaniiami zonal'nogo vetra v ekvatorial'noi stratosfere i solnechnoi aktivnost'iu nad severo-vostokom Evrazii za period 1979-2015 gg. // *Optika atmosfery i okeana.* – 2017. – Т. 30, № 5. – S. 409-413.

8. Gushchin G. P. Metody, pribory i rezul'taty izmereniia spektral'noi prozrachnosti atmosfery. – L.: Gidrometeoizdat. – 1988. – 200 s.

9. Barteneva O. D., Nikitinskaia N. V., Sakunov G. G., Veselova L. K. Prozrachnost' tolshchi atmosfery v vidimoi i blizhnei IK-oblasti spektra. – L.: Gidrometeoizdat. – 1991. – 224 s.

10. Shaw G. E., Reagan J. A., Herman B. M. Investigation of atmospheric extinction using direct solar radiation measurements made with a multiple wavelength radiometer // *J. Appl. Met.* – 1973. – Vol. 12. – Pp. 374-380.

11. Sivkov S. I. Metody rascheta kharakteristik solnechnoi radiatsii. – L.: Gidrometeoizdat. – 1968. – 232 s.

12. Piaskovskaia-Fesenkova E. V. Issledovanie rasseianiia sveta v zemnoi atmosfere. – M.: Izd-vo AN SSSR. – 1957. – 220 s.

13. Antiufeev V. S., Ivanov A. I., Livshits G. Sh., Mikhailov G. A. Opredelenie aerazol'nykh indikatsii rasseianiia bezoblachnoi atmosfery v spektral'noi oblasti 0,55–2,4 mkm // *Izv. AN SSSR. Fiz. atmosf. i okeana.* – 1980. – Т. 16, № 2. – S. 146-154.

14. Smerkalov V. A. Prikladnaia optika atmosfery / V. A. Smerkalov. – SPb.: Gidrometeoizdat. – 1997. – 334 s.

15. Kabanov D. M., Sakerin S. M. O metodike opredeleniia aerazol'noi opticheskoi tolshchi atmosfery v blizhnem IK diapazone spektra // *Optika atmosfery i okeana.* – 1997. – Т. 10, № 8. – S. 866-875.

16. ECMWF Newsletter N 110 – Winter 2006/07 / Ed. by B. Riddaway. European Center for Medium Range Weather Forecast. – 2007. – P. 53.

17. Levy R. C., Mattoo S., Munchak L. A., et al. The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean. – *Atmos. Meas. Tech.* – 2013. – № 6. – Pp. 2989-3034, doi: 10.5194/amt-6-2989-2013.

18. Solov'ev V. S., Vasil'ev M. S. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programm dlia EVM № 20126103912 Cloud Map Processing Script (CMPAS), vydano Federal'noi sluzhboi po intellektual'noi sobstvennosti, patentam i tovarnym znakam (Rospatent) 10 ianvaria 2012 g. Pravoobladatel': Uchrezhdenie Rossiiskoi akademii nauk Institut kosmofizicheskikh issledovaniim i aeronomii im. Iu.G. Shafera SO RAN.