17. http://rp5.ru/docs/about/ru.
18. http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2014/EGU2014-14973.pdf.
19. *Kurita N., Yoshida N., Inoue G., Chayanova E.A.* Modern isotope climatology of Russia: A first assessment // J. Geophys. Res. – 2004. – Vol. 109, D03102, doi:10.1029/2003JD003404.
20. *Araguás-Araguás L., Froehlich K., Rozanski K.* Stable isotope composition of precipitation over southeast Asia // J. Geophys. Res. – 1998. – Vol. 103(D22). –P. 28721–28742.
21. *Васильчук Ю.К., Котляков В.М.* Основы изотопной геокриологии и гляциологии. – М.: Изд-во МГУ, 2000. – 616 с.
22. *Ферронский В.И., Поляков В.А.* Изотопия гидросферы Земли. – М.: Научный мир, 2009. – 632 с.
23. *Friedman I., Benson C., Gleason J.* Isotopic changes during snow metamorphism / Stable Isotope Geochemistry: A Tribute to Samuel Epstein. The Geochemical Society, San Antonio / Taylor H. P., O'Neil J. R. and Kaplan I. R. (Eds), 1991. – P. 211–221.
24. *Hou S.G., Wang Y.T., Pang H.X.* Climatology of stable isotopes in Antarctic snow and ice: Current status and prospects // Chin Sci Bull. – 2013. – Vol. 58. – P. 1095–1106, doi: 10.1007/s11434-012-5543-y.

Поступила в редакцию 20.05.2015

УДК 551.52; 551.593

Температурный эффект аэрозоля в летний сезон над центральной частью Якутии

М.С. Васильев, С.В. Николашкин

Институт космофизических исследований и аэрономии СО РАН, г. Якутск

Приводятся результаты исследования температурного эффекта аэрозоля в летний сезон над центральной частью Якутии за период 2004–2014 гг. Использованы данные натурных и спутниковых измерений, а также климатических моделей NCEP/NCAR и ERA-Interim на основе тех же измерений. Данные по аэрозольному содержанию и распределение по размерам частиц получены по измерениям на солнечном фотометре CE-318 сети «AERONET» около Якутска. Впервые показано, что возмущение атмосферы аэрозольными частицами от воздействия очагов возгорания лесного массива приводит к снижению потока прямой солнечной радиации и при наличии отрицательной фазы уходящей длинноволновой наблюдается понижение приземной температуры воздуха.

Ключевые слова: приземная температура воздуха, аэрозоль, радиационный бюджет, квазинедельные ритмы, климатические модели.

The results of an investigation of temperature effect of aerosol in the summer season over the central part of Yakutia during the period 2004–2014 are presented. The data of ground-based and satellite measurements and also of climate models NCEP/NCAR and ERA-Interim, which are based on the same measurements. Aerosol depth and particle size distribution data are obtained using «AERONET» CE-318 sunphotometer near Yakutsk.It is first time showed that a disturbance of the atmosphere by aerosol particles which is caused by forest fires area lead to a decrease of direct solar radiation flow and in an additional presence of a negative phase of upward longwave one, a surface air temperature decreasing is observed.

Key words: surface air temperature, aerosol, radiative budget, quasi-weekly rythms, climate models.

Введение

Известно, что атмосферный аэрозоль является одним из климатообразующих компонент атмосферы [1, 2]. В зависимости от размеров частиц (дисперсности) аэрозоль делят на три класса: дымы (высокодисперсные 0,001 – 0,1 мкм); облака, туманы (среднедисперсные 0,1 – 10 мкм); пыль (грубодисперсные, размеры частиц которых более 10 мкм) [3].

Радиационный бюджет атмосферы во многом зависит от концентрации аэрозольных частиц, которые имеют свойство рассеивать и поглощать солнечную и тепловую радиацию [4], а также воздействуют на микроструктуру обла-

ВАСИЛЬЕВ Михаил Семенович – м.н.с., m.s.vasiliev@ikfia.sbras.ru; НИКОЛАШКИН Семен Викторович – к.ф.-м.н., зав. лаб., nikolashkin@ikfia.sbras.ru.

ков, процессы их образования, выпадение осадков и т.д. [5–7]. В свою очередь известно, что среди внешних факторов, регулирующих суточную амплитуду приземной температуры воздуха (ПТВ), солнечная радиация играет едва ли не первостепенную роль. Связано это с изменением величины приходящей солнечной радиации и уходящей в течение суток. Таким образом, можно предположить, что помутнение прозрачности атмосферы при высокой концентрации аэрозоля может привести к спаду или росту суточной ПТВ. Например, в работе [8] проведены исследования температурного эффекта пылевого аэрозоля в период пылевой мглы над юго-восточной частью Центральной Азии. Пыльные бури и мгла являются существенным метеорологическим фактором данного региона. Автором [8] установлено, что мощные пылевые бури приводят к резкому понижению дневной температуры воздуха и некоторому повышению ночной. В целом наблюдается снижение ПТВ.

В настоящей работе ставится цель исследования температурного эффекта аэрозоля в летний сезон над центральной частью Якутии.

Материалы исследования

В работе были использованы среднесуточные значения ПТВ (^{o}C, ст. Якутск) за период июнь–август 2004–2014 гг. – данные ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» (http://www.meteo.ru), а также параметры оптических свойств атмосферы, таких как аэрозольная оптическая толща (АОТ – уровень 2, τ_{500}), параметр Ангстрема ($\tau_{500-870}$) и содержание водяного пара H_2O (см), которые получены с помощью солнечного фотометра CIMEL CE-318 (61.662^{o} с.ш., 129.367^{o} в.д.), входящего в сеть «AERONET», расположенного на полигоне ИКФИА СО РАН в 50 км к югу от Якутска в степной долине р. Лены [9, 10]. АОТ – это безразмерная величина, которая характеризует ослабление интенсивности светового потока при прохождении через атмосферный аэрозоль. Солнечный фотометр CE-318 измеряет прямую солнечную радиацию на 8 длинах волн видимого спектра: 340, 380, 440, 500, 670, 870, 1020, 1640 нм. Суммарная ошибка измерения спектральной АОТ изменяется от ± 0,01 до ± 0,02 и спектрально зависит от больших ошибок в ультрафиолетовой области спектра (длина волны от 10 до 400 нм) [11].

Использование наземных экспериментальных данных обусловлено с точки зрения того, что спутниковые данные о влиянии аэрозолей на климат оказались недостоверными: их «холодильный» эффект занижен в 3–6 раз [12]. Авторы работы [12] считают, что спутниковые данные в этом случае недостоверны и могут использоваться только в связке с глобальными климатическими моделями. В связи с чем дополнительно были привлечены данные климатических моделей (реанализ) NCEP/NCAR и ERA-Interim [13, 14]: нисходящий поток солнечной радиации (НПСР – коротковолновая радиация, Вт/м^2), уходящая длинноволновая радиация (УДР, Вт/м^2), ПТВ (Кельвин, с последующим преобразованием в градус Цельсия) и H_2O (кг/м^2). С дополнительным описанием данных реанализов и их применением в области исследования ПТВ над регионом центра Восточной Сибири (Якутия) можно ознакомиться в работах [15, 16].

Данные по содержанию концентрации в атмосфере двуокиси углерода (CO_2, млн.$^{-1}$) получены с помощью ИК-зонда AIRS (Atmospheric InfraRed Sounder), установленного на борту спутника EOS/Aqua (НАСА, запущен в 2002 г.) [17] (данные находятся в свободном доступе в виде файлов HDF формата (https://climatedataguide.ucar.edu/)). В работе [18] показана пригодность результатов спутникового мониторинга тропосферной концентрации атмосферного CO_2 с приемлемой точностью относительной погрешности порядка 1 % над районами бореальных экосистем Сибири.

Результаты и обсуждение

Данные АОТ в различные периоды имеют многочисленные пропуски наблюдения в определенные дни, однако, несмотря на это, без исключения были рассчитаны коэффициенты корреляции со значениями ПТВ. Дни с отсутствием данных наблюдения, в частности, в августе, связаны, скорее всего, с тем, что измеряемые параметры с использованием высокого доверительного уровня 2 свидетельствуют о недостаточности проводимой процедуры и о сравнительно частом наличии облаков и дней с осадками [19, 20]. Предварительные результаты исследования [21, 22] показали, что между данными ПТВ и АОТ (в основном это высокодисперсные аэрозольные частицы, имеющие размер, не превышающий 0,003 мкм) наблюдается неоднозначная картина взаимосвязи или ее отсутствие. Преимущественно корреляционная взаимосвязь положительна, что говорит об отсутствии существенного влияния аэрозольного помутнения атмосферы на радиационный бюджет и ПТВ. Однако известно, что территория Якутии является одним из пожароопасных регионов в Северной Азии с максимумом очагов возгорания в летние месяцы [23]. Данный источник выброса в атмосферу продуктов горения лесного массива, сопровождающийся фотохимическим смогом (дым), вероятней всего является основным

фактором увеличения АОТ в регионе, что вызывает понижение прозрачности атмосферы и, следовательно, антикорреляционную связь АОТ и ПТВ, как например, в августе 2010 г. (R= –0,285) и июле 2005 г. (R=–0,368) с уровнем значимости 99 % при $r_{крит}$=0,45. В июне за весь период исследования наблюдалась положительная корреляционная связь АОТ и ПТВ.

На рис. 1 для примера представлены используемые параметры в работе для двух периодов со схожей картиной временных вариаций АОТ в июле 2005 г. и июне 2011 г. (АОТ & ПТВ R=0,4). Периоды отличаются тем, что в первом случае при наличии аэрозольного помутнения атмосферы наблюдается понижение ПТВ. Из рис. 1, а видно, что в июле 2005 г. отмечается резкий рост значений АОТ на 11–13-е сутки свыше 0,5 (превышение составило ~ 14 %) относительно среднего фонового значения 1–10 июля порядка 0,08 с последующим спадом и восстановлением абсолютных значений на 16–18-е сутки. По нашему мнению, причиной резкого увеличения абсолютных значений АОТ с 11–13 июля 2005 г. стал фотохимический смог, образовавшийся от очагов возгорания лесного массива на территории Якутии (рис. 2). Возможно, это и стало основной причиной резкого падения НПСР (например, по данным NCEP/NCAR – 205 Вт/м^2 относительно среднего фонового значения 317 Вт/м^2, что примерно составило 65 %, а по наземным ~ 24 %), вследствие чего на 12-е сутки наблюдается понижение ПТВ примерно до 12 ^{o}C (ст. Якутск, ERA-Interim) относительно среднего фонового значения ~ 21,5 ^{o}C. При этом аналогично [8] наблюдается небольшой рост ПТВ в ночное время,

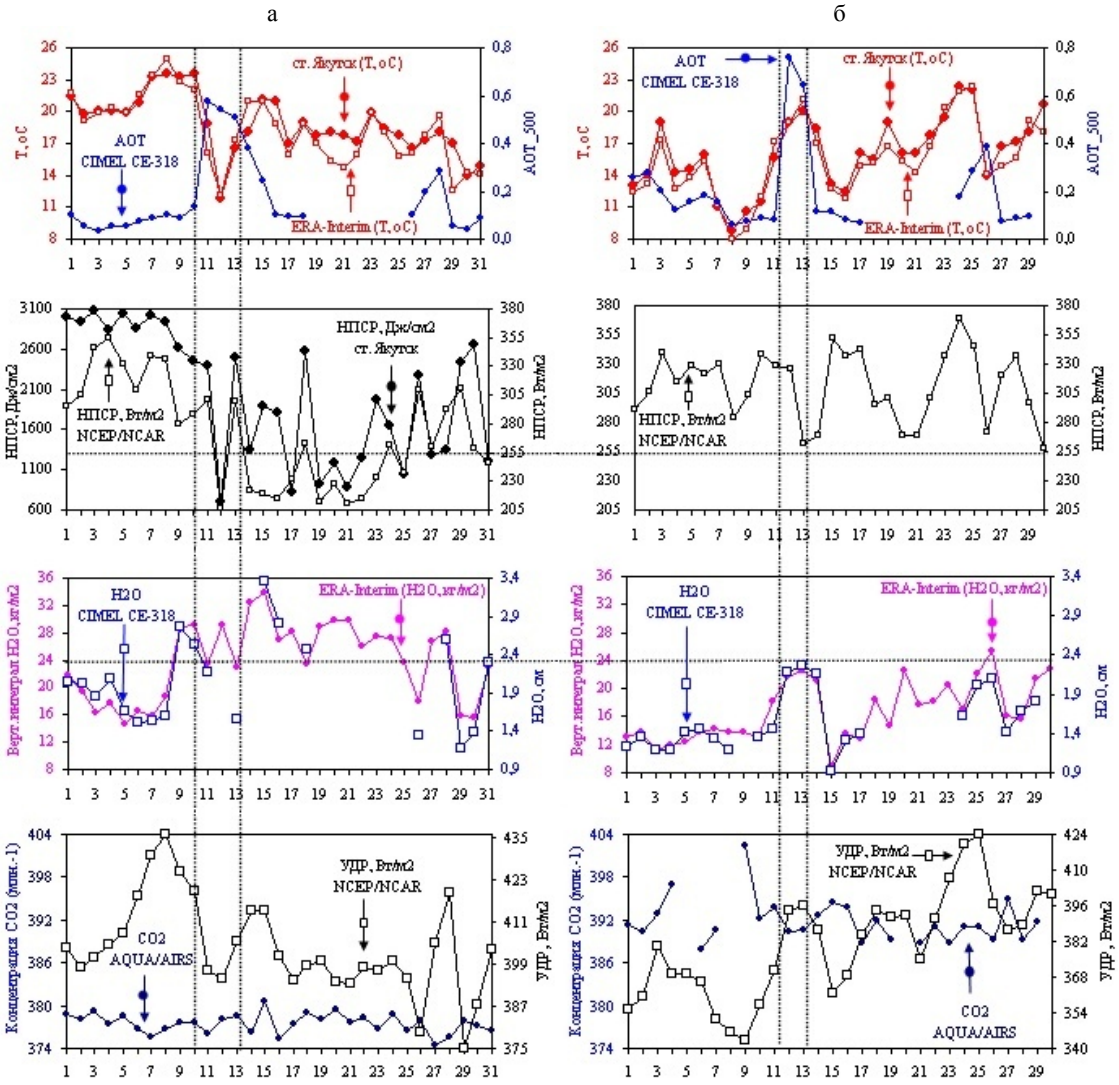

Рис. 1. Среднесуточные вариации ПТВ, АОТ, НПСР, УДР, H_2O и CO_2 в июле 2005 г. (а) и июне 2011 г. (б)

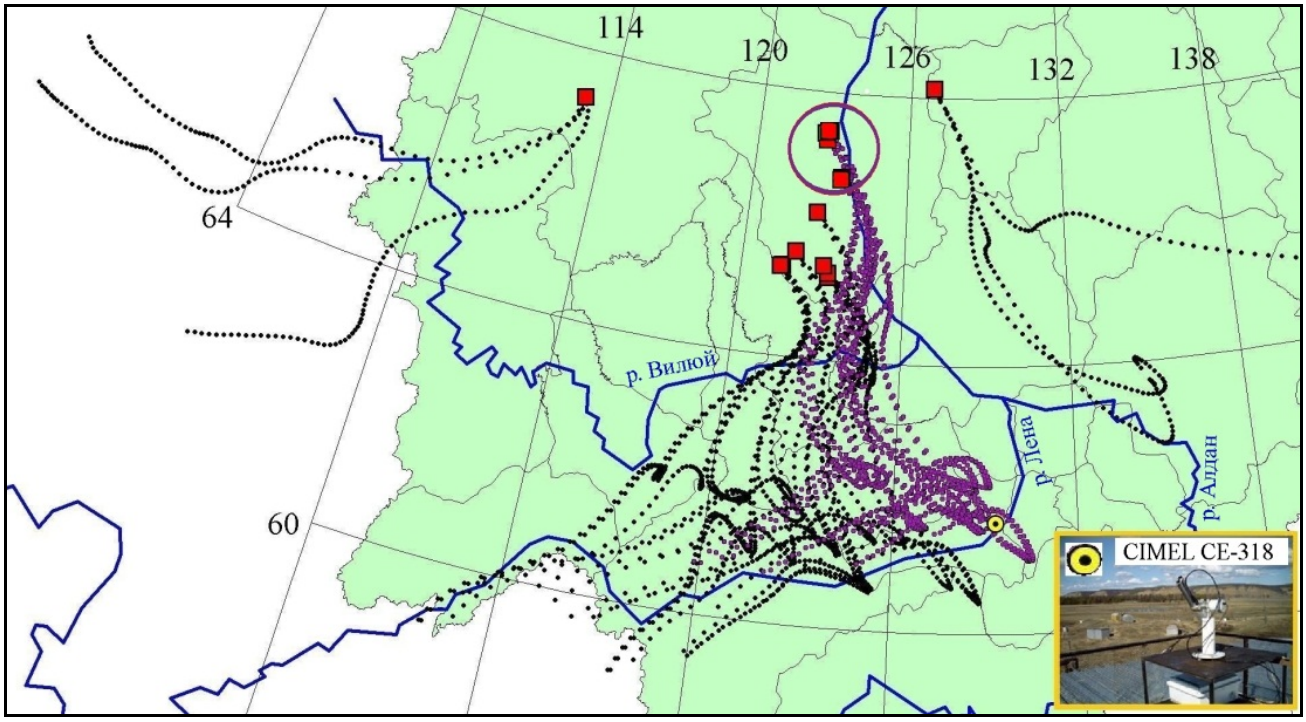

Рис. 2. Траектории распределения воздушных масс фотохимического смога (дымы) на высотах 0, 500 и 1000 м (точки черного и фиолетового цвета) по данным модели HYSPLIT [26] от очагов лесных пожаров (данные AVHRR/NOAA [23] – квадраты красного цвета) за период 11–13 июля 2005 г. Сплошным красным кругом отмечена зона очагов пожаров, траектории смога которых непосредственно охватили местоположение фотометра CIMEL CE-318. Сплошные синие линии – основные элементы гидрографии

примерно на 2 °С. Например, в [24] описано понижение ПТВ в дневное время с одновременным уменьшением НПСР на 20–30 % при переносе облаков пыли из Сахары в Нигерию.

Данные ERA-Interim с широтно-долготным разрешением 0,125° х 0,125° вокруг фотометра привлечены в связи с тем, что нахождение метеостанции Якутск (расстояние до фотометра CIMEL CE-318 ~ 50 км) может исказить реальную картину влияния АОТ на среднесуточные вариации ПТВ. Влиянием такого проявления может оказаться так называемый «городской остров тепла», который является отражением суммы микроклиматических изменений, связанный с антропогенным преобразованием городской поверхности [25]. Однако видно, что абсолютные значения ПТВ (ст. Якутск, ERA-Interim) и их функции аппроксимации практически схожи, за исключением явных амплитудных различий в определенные дни.

Схожая картина временных вариаций АОТ и ее причины возмущения 12–13 июня наблюдаются в 2011 г. (рис. 1, б). Однако в этот период аэрозольного помутнения атмосферы отмечается противоположный эффект, предположительно «парниковый» – возрастание ПТВ.

Существенного спада НПСР во время возмущения АОТ в июне 2011 г. относительно фоновых значений не наблюдается. Уровень содержания водяного пара в обоих случаях 11–13 июля и 12–13 июня практически одинаков, однако, в июне 2011 г. отмечается превышение средней концентрации CO_2 на 96 % относительно июля 2005 г. Значение таких составляющих, как CO_2, H_2O и др., связано с поглощением и излучением ими инфракрасной радиации, что приводит к возникновению парникового эффекта [27]. Парниковый эффект водяного пара усиливается углекислым газом, который всегда содержится в атмосфере в результате естественного круговорота углерода в природе.

Также можно отметить, что в обоих случаях наблюдаются квазинедельные ритмы вариаций УДР с фазами роста и спада, в связи с чем нами проведены спектральные анализы Фурье (рис. 3). Из рис. 3 и встроенного графика в правом верхнем углу видно, что отмечается диапазон всплесков спектральной плотности значений УДР, соответствующий периоду квазидвухлетних колебаний от 5 до 8 дней, а также пик вблизи максимальных значений в разные годы на частоте 0,13, соответствующий периоду 7,5 дней. Схожая картина колебаний УДР наблюдается в июле и августе. Такие ритмы колебания УДР во многом могут зависеть от квазинедельных ритмов приливных сил [28, 29], обуславли-

вающих появление своего рода микросезонов погоды – естественных синоптических периодов (ЕСП), открытых Б.П. Мультановским [30] в 1915 г. Смены ЕСП совпадают с экстремумами приливных колебаний скорости вращения Земли.

Исходя из рис. 1–3 и вышеописанного, можно говорить о том, что в исследуемом регионе активность лесных пожаров способна привести к аэрозольному помутнению атмосферы. При этом АОТ является существенным фактором, препятствующим проникновению солнечного света. Наряду с этим возмущение атмосферы аэрозольными частицами при наблюдаемой отрицательной фазе УДР может привести к понижению среднесуточных вариаций ПТВ. Связано это с тем, что УДР, обеспечивающая понижение температуры воздуха в ночное время за счет излучения тепла Земли при наблюдаемой отрицательной фазе, хотя и увеличивает температуру в ночное время, но в связи с отсутствием существенного притока солнечной энергии в дневное время наблюдается общее ее понижение.

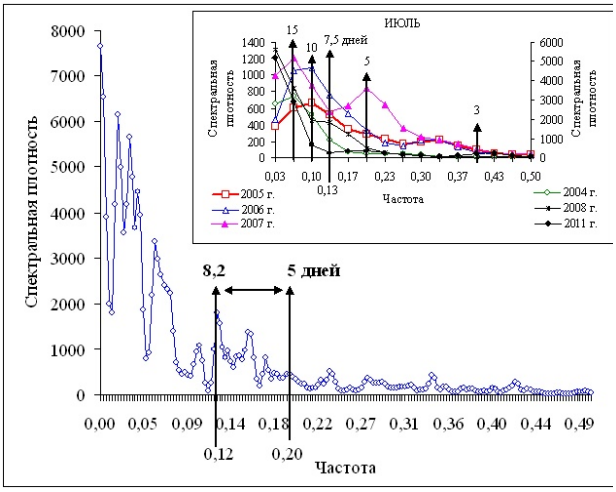

Рис. 3. Спектральный анализ средних среднесуточных значений УДР (NCEP/NCAR) за июль 2004–2014 гг. В верхнем правом углу дополнительно отображен график спектрального анализа среднесуточных значений УДР за июль в различные годы. На графиках по горизонтальным осям отображена частота, соответствующая определенным периодам (сут)

Выводы

В работе на примере двух событий показано, что в летний сезон над центральной частью Якутии взаимосвязь АОТ и ПТВ проявляется по-разному. Помутнение атмосферы аэрозольными частицами очагов возгорания лесного массива способно привести к снижению потока прямой солнечной радиации, а при дополнительном наличии отрицательной фазы УДР к понижению среднесуточного значения ПТВ.

Работа поддержана грантами РФФИ №№ 15-05-05320а, 13-05-01036а.

Литература

1. *Кондратьев К.Я.* Аэрозоль как климатообразующий компонент атмосферы. 2. Прямое и косвенное воздействие на климат / К.Я. Кондратьев // Оптика атмосферы и океана. – 2002. – Т. 15, № 4. – С. 301–320.

2. *Кондратьев К.Я.* Аэрозоль и климат: современное состояние и перспективы разработок. 3. Аэрозольное радиационное возмущающее воздействие / К.Я. Кондратьев // Оптика атмосферы и океана. – 2006. – Т. 19, № 7. – С. 565–575.

3. *Чекман И.С.* Аэрозоли – дисперсные системы / И.С. Чекман, А.О. Сыровая, С.В. Андреева, В.А. Макаров – Х.: Цифровая друкарня № 1. – 2013. – 100 с.

4. *Haywood J.* Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosol: A review / J. Haywood, O. Boucher // Rev. Geophys. –2000. – V. 38, № 4. – P. 513–543.

5. *Twomey S.* The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds / S. Twomey // J. Atmos. Sci. – 1977. – V. 34, № 7. – P. 1149–1152.

6. *Albrecht B.* Aerosol, cloud microphysics, and fractional cloudiness / B. Albrecht // Science. – 1989. – V. 245, № 4923. – P. 1227–1230.

7. *Johnson B.* The semi-direct aerosol effect: Impact of absorbing aerosols on marine stratocumulus / B. Johnson, K. Shine, P. Forster // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. – 2004. – V. 130, № 599. – P. 1407–1422.

8. *Абдуллаев С.Ф.* Комплексные исследования пылевых и газовых примесей в аридных зонах и их влияние на региональный климатический режим в юго-восточной части центральной Азии: Дис. … д.ф.-м.н.: 25.00.30. – Душанбе, 2014. – 315 с.

9. *Holben B.N.* AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization / B.N. Holben, T.F. Eck, I. Slutsker et. al. // Remote Sensing & Environment. – 1998. – № 66. – P. 1–16.

10. *Dubovik O.* Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) Sun and sky-radiance measurements / O. Dubovik, A. Smirnov, B.N. Holben et. al. // J. Geophys. Res. – 2000. – V. 105, №4. – P. 9791–9806.

11. *Исследование* радиационных характеристик аэрозоля в азиатской части России / Под общей ред. С.М. Сакерина. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2012. – 484 с. + вкл.

12. *Penner J.E.* Satellite methods underestimate indirect climate forcing by aerosols / J.E. Penner, L. Xu, M. Wang // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2011.– V.108.– Issue 33. – P.13404–13408, doi: 10.1073/pnas.1018526108.

13. *Kistler R.* The NCEP-NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation / R. Kistler, E. Kalnay, W. Collins et. el. // Bull. Amer. Met. Soc. – 2001. – V. 82, № 2. – P. 247–267.

14. *ECMWF* Newsletter No. 110 – Winter 2006/07 / Riddaway B. (ed.) Reading: European Center for Medium-Range Weather Forecast. – 2007. – P. 53.

15. *Васильев М.С.* Сравнение приземной температуры воздуха в Якутии по данным реанализа и наземных наблюдений / М.С. Васильев, С.В. Николашкин, Р.Р. Каримов // Вестник СВФУ. – 2014. – Т. 11, № 5. –С. 82–88.

16. *Васильев М.С.* Временная изменчивость приземной температуры воздуха в Якутии во время крупных Форбуш-понижений / М.С. Васильев, С.В. Николашкин, Р.Р. Каримов // Вестник СВФУ. – 2014. – Т. 11, № 6. – С. 19–29.

17. *Chahine M.* On the determination of atmospheric minor gases by the method of vanishing partial derivatives with application to CO2 / M. Chahine, C. Barnet et. el. // Geophys. Res. Lett. – 200. – 32. – L22803, doi: 10.1029/2005GL024165.

18. *Кухарский А.В.* Определение средней концентрации атмосферного диоксида углерода в тропосфере по данным спутникового ИК-зондировщика высокого спектрального разрешения / А.В. Кухарский, А.Б. Успенский // Метеорология и гидрология. – 2009. – № 4. – С. 15–28.

19. *Матющенко Ю.Я.* Малоугловые аэрозольные и облачные образования на фоне преобладающе безоблачной атмосферы / Ю.Я. Матющенко, В.Е. Павлов // Межрегиональный экологический форум: Сб. мат. форума. – Барнаул, 2004. – С. 138–141.

20. *Павлов В.Е.* Отбор безоблачных ситуаций по данным AERONET / В.Е. Павлов, П.М. Зацепин, Ю.Я. Матющенко // XI Рабочая группа «Аэрозоли Сибири». – Томск, 2004. – С. 17.

21. *Васильев М.С.* Взаимосвязь вариаций температуры воздуха и содержания аэрозоля в центральной Якутии в летнее время / М.С. Васильев, С.В. Николашкин, А.А. Решетников, С.В. Титов / Аэрозоли Сибири. XXI Рабочая группа: Тезисы докладов. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2014. – С. 57.

22. *Васильев М.С.* Влияние аэрозоля на температуру воздуха в летний сезон над центральной частью Якутии / М.С. Васильев, С.В. Николашкин / Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XXI Межд. симпозиума [Электронный ресурс]. – Томск: ИОА СО РАН, 2015. – в печати.

23. *Васильев М.С.* Исследование возможных причин возникновения лесных пожаров в Якутии по данным дистанционных наблюдений / М.С. Васильев, Р.Р. Каримов // В мире научных открытий. – Красноярск: Научно-инновационный центр, 2014. – № 4 (52). – С. 161–171.

24. *Советско-американский* эксперимент по изучению аридного аэрозоля / Под ред. Г.С. Голицына – СПб.: НПО «Тайфун», 1992. – 208 с.

25. *Oke T.P.* Климаты пограничного слоя / Т.Р. Oke. – Л.: Гидрометеоиздат, 1982. – 359 с.

26. *Draxler R.R.* HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) / R.R. Draxler, G.D. Rolph / Model access via NOAA ARL READY Website: http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php. – NOAA Air Resources Laboratory, College Park, MD. – 1997.

27. *Bach W.* Carbon dioxide: Current Views and Developments in Energy / W. Bach, A.J. Crane // Climate Res. – 1982. – P. 16.

28. *Сидоренко Н.С.* Атмосферные процессы и вращение Земли / Н.С. Сидоренко. – СПб.: Гидрометеоиздат, 2002. – 366 с.

29. *Сидоренко Н.С.* Лунно-солнечные приливы и атмосферные процессы / Н.С. Сидоренко // Природа. – 2008. – № 2. – С. 23–31.

30. *Мультановский Б.П.* Основные положения синоптического метода долгосрочных прогнозов погоды / Б.П. Мультановский – М.: изд. ЦУЕГМС, 1933. – 139 с.

Поступила в редакцию 29.05.2015