

## Температурный эффект дымового аэрозоля в летний сезон над центральной частью Якутии за период 2004–2014 гг.

М.С. Васильев, С.В. Николашкин\*

*Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН  
677980, г. Якутск, пр. Ленина, 31*

Поступила в редакцию 22.09.2015 г.

Представлены результаты исследования температурного эффекта дымового аэрозоля в летний сезон над центральной частью Якутии за период 2004–2014 гг. Используются данные наземных и спутниковых измерений, а также климатических моделей NCEP/NCAR и ERA-Interim, основанных на регулярных метеорологических наблюдениях, аэрологической и спутниковой информации.

Впервые показано, что возмущение атмосферы аэрозольными частицами вследствие очагов возгорания лесного массива приводит к снижению потока солнечной радиации и при наличии отрицательной фазы уходящей длинноволновой радиации наблюдается спад амплитуды приземной температуры воздуха.

*Ключевые слова:* приземная температура воздуха, аэрозоль, радиационный бюджет, климатические модели, квазинедельные ритмы; surface air temperature, aerosol, radiative budget, climate models, quasi-weekly rhythms.

### Введение

В настоящее время исследования в области влияния атмосферного аэрозоля на радиационный бюджет и климат в целом до сих пор являются актуальными в науках о Земле. Несмотря на достаточное количество разного рода работ, проблема «Аэрозоль–радиация–климат» остается открытой, сложной и запутанной. Связано это во многом с недостаточностью сети экспериментальных баз наблюдений, их малым количеством и плотностью расположения, в частности на территории Якутии.

Радиационный бюджет атмосферы во многом зависит от концентрации аэрозольных частиц, которые имеют свойство рассеивать и поглощать солнечную и тепловую радиацию [1–4], а также воздействуют на микроструктуру облаков, процессы их образования, выпадение осадков и т.д. [5–7]. В свою очередь известно, что атмосферный аэрозоль является одним из климатообразующих компонентов атмосферы [1, 2], который принято делить на три класса в зависимости от размеров частиц (дисперсности): думы (высокодисперсные, 0,001–0,1 мкм); облака и туманы (среднедисперсные, 0,1–10 мкм); пыль (грубодисперсные, размеры частиц которых более 10 мкм) [3]. Также известно, что среди внешних факторов, регулирующих суточную амплитуду при-

земной температуры воздуха (ПТВ, °С), 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 атмосферы при высокой концентрации частиц аэрозольного происхождения может привести к спаду или росту суточной ПТВ. Например, авторами работы [8 и ссылки в ней] проведено исследование температурного эффекта пылевого аэрозоля в период пыльной мглы над юго-восточной частью Центральной Азии (пыльные бури и мгла являются существенным метеорологическим фактором данного региона). Установлено, что мощные пыльные бури приводят к резкому понижению дневной температуры воздуха и некоторому повышению ночной. В целом, по данным экспериментальных наблюдений отмечается снижение ПТВ.

Целью работы является исследование температурного эффекта дымового аэрозоля в летний сезон над центральной частью Якутии за период 2004–2014 гг.

### Материалы исследования

В настоящей работе были использованы среднесуточные значения ПТВ (ст. Якутск) за период июнь–август 2004–2014 гг. – данные ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» (<http://www.meteo.ru>). Параметры оптических свойств атмосферы: аэрозольная оптическая толща (АОТ – уровень 2,  $\lambda_{500}$ ), параметр Ангстрема ( $\lambda_{500-870}$ ) и содержание водяного пара

\* Михаил Семенович Васильев (m.s.vasiliev@ikfia.sbras.ru); Семен Викторович Николашкин (nikolashkin@ikfia.sbras.ru).

H<sub>2</sub>O (см), получены с помощью солнечного фотометра CIMEL CE-318 (61,662° с.ш., 129,367° в.д.). Прибор, входящий в сеть «AERONET», расположен на полигоне ИКФИА СО РАН в 50 км к югу от Якутска в степной долине р. Лены [9, 10]. Солнечный фотометр CE-318 измеряет прямую солнечную радиацию на 8 длинах волн видимого спектра: 340, 380, 440, 500, 670, 870, 1020 и 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 тем, что спутниковые данные о влиянии аэрозолей на климат оказались недостоверными: их «холодильный» эффект занижен в 3–6 раз [12]. Авторы [12] считают, что спутниковые данные в этом случае недостоверны и могут использоваться только наряду с глобальными климатическими моделями. В связи с этим нами принято решение дополнительно привлечь данные климатических моделей (реанализ) NCEP/NCAR и ERA-Interim [13, 14], основанных на метеорологической, аэрологической и спутниковой информации: нисходящий поток солнечной радиации (НПСР – коротковолновая радиация, Вт/м<sup>2</sup>), уходящая длинноволновая радиация (УДР, Вт/м<sup>2</sup>), ПТВ и H<sub>2</sub>O (кг/м<sup>2</sup>). С дополнительным описанием данных реанализов и их применением в области исследования ПТВ над регионом Якутии можно ознакомиться в работах [15, 16].

При анализе полученных результатов также были использованы данные по концентрации в атмосфере двуокси углерода (CO<sub>2</sub>, млн<sup>-1</sup>). Данные о CO<sub>2</sub>, находящиеся в свободном доступе в виде файлов формата HDF (<https://climatedataguide.ucar.edu/>), получены с помощью ИК-зонда AIRS (Atmospheric InfraRed Sounder), установленного на борту спутника EOS/Aqua (НАСА, запущен в 2002 г.) [17]. В работе [18] показана пригодность результатов спутникового мониторинга тропосферной концентрации атмосферного CO<sub>2</sub> с приемлемой точностью относительной погрешности порядка 1% над районами бо-реальных экосистем Сибири.

## Результаты и обсуждение

Предварительные результаты исследования [19–21] 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. Данные наблюдения АОТ в различные периоды имеют многочисленные пропуски в определенные дни, однако, несмотря на это, коэффициенты корреляции со значениями ПТВ были рассчитаны для всего временного интервала исследования. Дни с отсутствием данных наблюдения АОТ (уровень «2»), в частности в августе, свидетельст-

вуют о технической неисправности прибора и о сравнительно частом наличии облаков и дней с осадками [22, 23]. Корреляционная взаимосвязь ПТВ преимущественно положительна, что говорит об отсутствии существенного влияния аэрозольного помутнения атмосферы на радиационный бюджет и ПТВ. Однако стоит отметить факт того, что территория Якутии – один из пожароопасных регионов в Северной Азии с максимумом очагов возгорания в летние месяцы [24]. 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, наблюдаемую за весь период исследования антикорреляционную связь АОТ и ПТВ, как, например, в августе 2010 г. (коэффициент корреляции  $R = -0,285$ ) и июле 2005 г. ( $R = -0,368$ ) с уровнем значимости 99% при критическом значении коэффициента корреляции  $r_{\text{крит}} = 0,45$ .

На рис. 1 представлены и анализируются полученные результаты на основе двух событий со схожей картиной временных вариаций АОТ в июле 2005 г. и июне 2011 г. (АОТ & ПТВ  $R = 0,4$ ).

Рассматриваемые периоды отличаются тем, что в первом случае при наличии аэрозольного помутнения атмосферы наблюдается понижение ПТВ. Видно (рис. 1, а), что в июле 2005 г. наблюдается резкий рост значений АОТ: на 11–13-е сут выше 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 сут. По нашему мнению, причиной резкого увеличения абсолютных значений АОТ 11–13 июля 2005 г. стал фотохимический смог, образовавшийся от очагов возгорания лесного массива на территории Якутии (рис. 2). Наблюдаемые траектории воздушных масс, содержащие облака продуктов горения лесного массива от очагов возгорания по направлению к расположению солнечного фотометра, рассчитаны при помощи модели HYSPLIT [25] для всех дней наблюдения. Необходимые метеорологические данные для HYSPLIT заимствуются из расчетов метеорологических моделей, основанных на результатах натурных измерений. Возможно, это и стало основной причиной резкого падения НПСР (например, по данным NCEP/NCAR – 205 Вт/м<sup>2</sup>, что составило примерно 65% относительно среднего фонового значения 317 Вт/м<sup>2</sup>, а по данным наземных измерений ~24%), вследствие чего на 12-е сут наблюдается понижение ПТВ примерно до 12 °С (ст. Якутск, ERA-Interim) при среднем фоновом значении ~21,5 °С. При этом аналогично работе [8], отличительной чертой которой является исследование влияния пылевых бурь на ПТВ, наблюдается небольшой рост ПТВ в ночное время примерно на 2 °С (рис. 3). Например, в [26] описано понижение ПТВ в дневное время с одновременным уменьшением НПСР на 20–30% при переносе облаков пыли из Сахары в Нигерию.

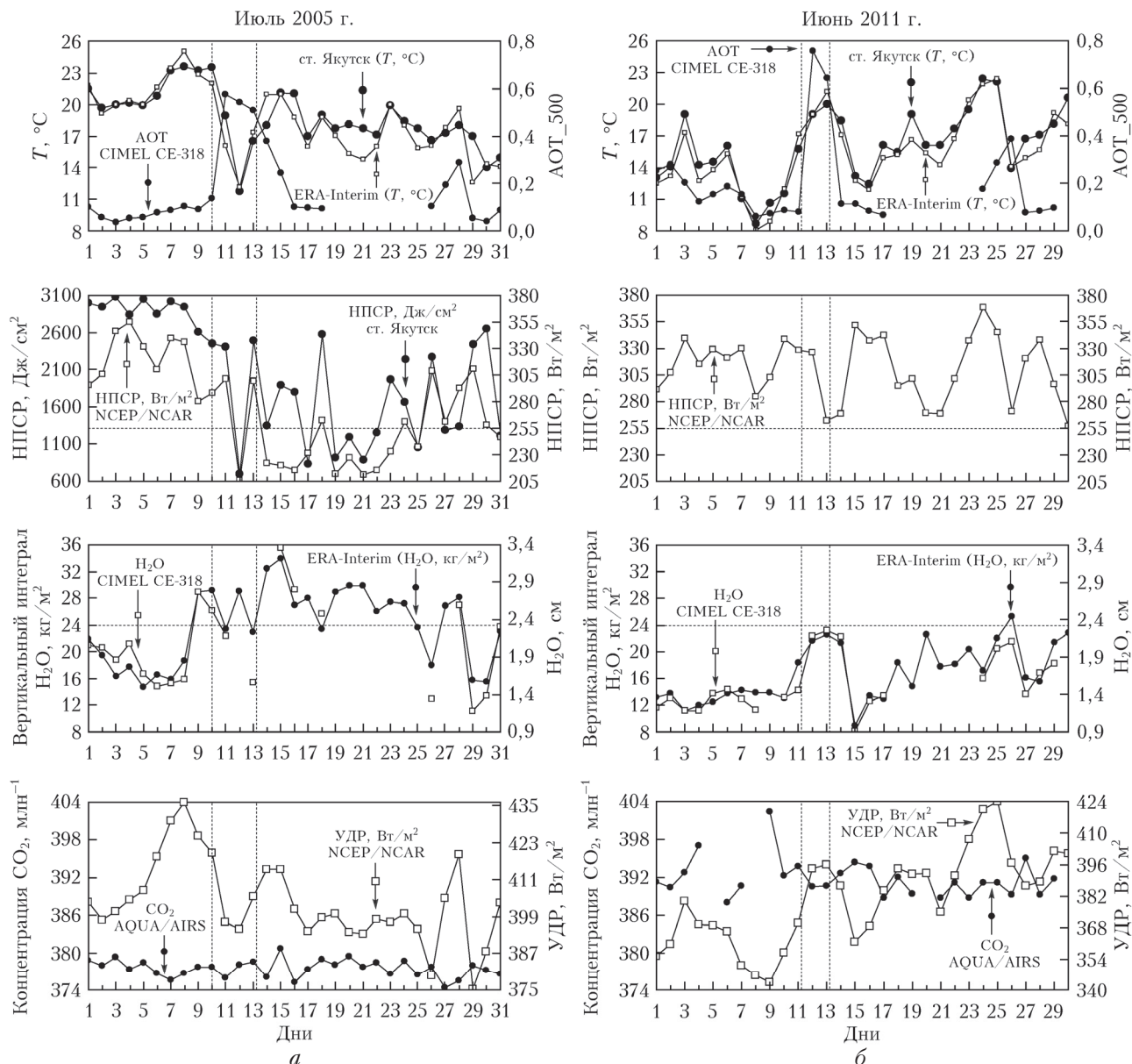


Рис. 1. Среднесуточные вариации ПТВ, АОТ, НПСР, УДР, H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub> в июле 2005 г. (а) и июне 2011 г. (б)

Данные ERA-Interim с широтно-долготным разрешением  $0,125 \times 0,125^\circ$  вокруг фотометра привлечены в связи с тем, что нахождение метеостанции Якутск (расстояние до фотометра CIMEL CE-318  $\sim 50$  км) может исказить реальную картину влияния АОТ на среднесуточные вариации ПТВ из-за «городского острова тепла» [27]. Однако видно (рис. 1), что абсолютные значения ПТВ (по данным ст. Якутск, ERA-Interim) практически схожи, за исключением явных амплитудных различий в определенные дни.

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

Существенного спада НПСР во время возмущения АОТ в июне 2011 г. относительно фоновых зна-

чений не наблюдается. Уровень содержания водяного пара в обоих случаях 11–13 июля и 12–13 июня практически одинаков. Однако в июне 2011 г. наблюдается превышение средней концентрации CO<sub>2</sub> на 96% относительно июля 2005 г. Значение таких составляющих, как CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O и др., связано с поглощением и излучением ими инфракрасной радиации, что приводит к возникновению парникового эффекта [28]. 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 этим нами проведен спектральный анализ Фурье (рис. 4).

Из рис. 4 и фрагмента в правом верхнем углу видно, что наблюдается диапазон всплесков спек-

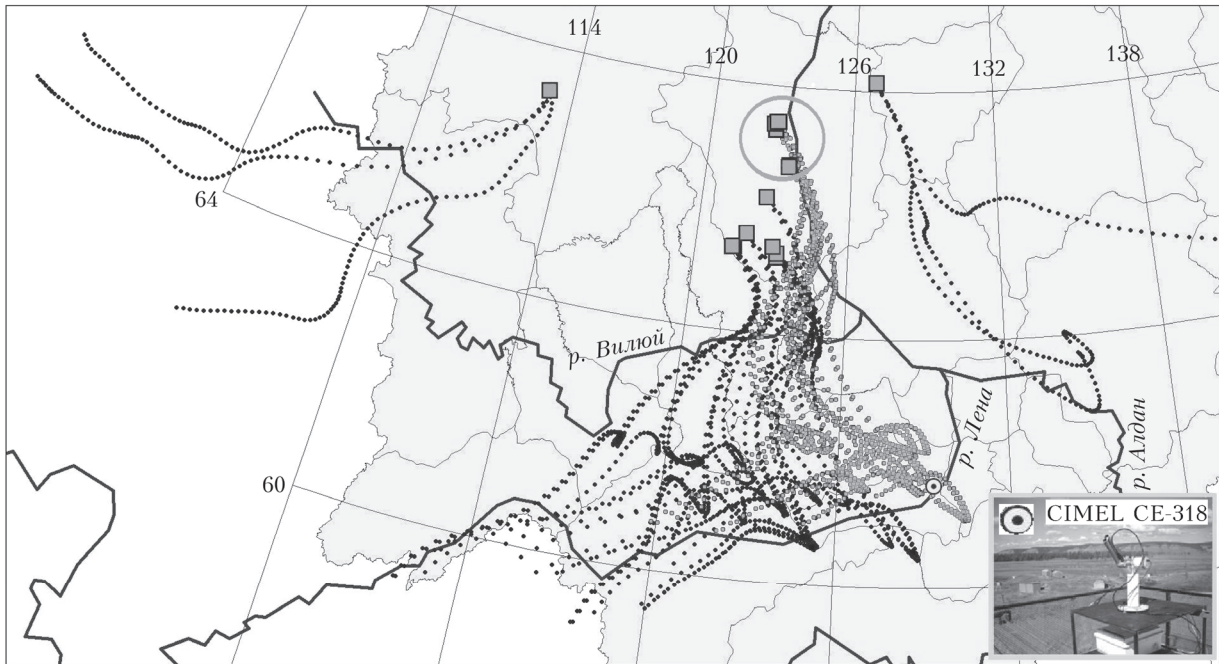


Рис. 2. Траектории распределения воздушных масс фотохимического смога (дымы) на высотах 0, 500 и 1000 м (точки черного и серого цвета) по данным модели HYSPLIT [27] от очагов лесных пожаров (данные AVHRR/NOAA [24] – квадраты) за период 11–13 июля 2005 г. Кругом отмечена зона очагов пожаров и траектории воздушных масс смога, которые непосредственно охватили местоположение фотометра CIMEL CE-318. Сплошные жирные линии – основные элементы гидрографии

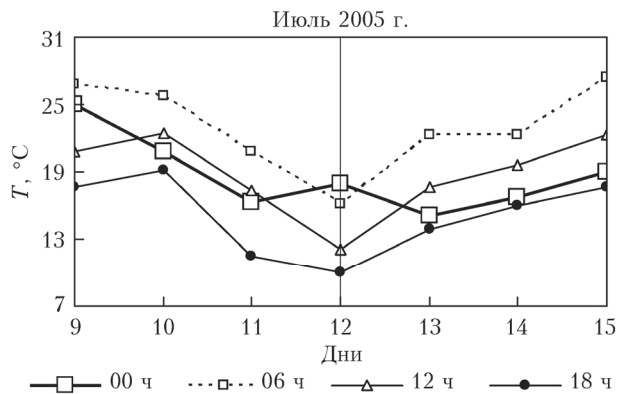


Рис. 3. Временные вариации ПТВ за период 9–15 июля 2005 г. для 00, 06, 12 и 18 ч

тральной плотности значений УДР, соответствующий периоду квазинедельных 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 [29, 30], обуславливающих появление своего рода микросезонов погоды – естественных синоптических периодов (ЕСП), открытых Мультиановским [31] в 1915 г. Смены ЕСП совпадают с экстремумами приливных колебаний скорости вращения Земли.

Исходя из рис. 1–4 и изложенного материала, можно говорить о том, что в исследуемом регионе активность лесных пожаров способна привести к аэ-

розольному помутнению атмосферы. В отличие от других регионов, например юго-восточной части Центральной Азии, где в основном аэрозольное помутнение атмосферы возмущается пыльными бурями, в Якутии очаги возгорания лесного массива являются основным фактором увеличения АОТ. При этом АОТ – существенный фактор, препятствующий проникновению солнечного света. Наряду с этим возмущение атмосферы аэрозольными частицами при наблюдаемой отрицательной фазе УДР может привести к уменьшению среднесуточных вариаций ПТВ. Связано это с тем, что хотя УДР, обеспечивающая понижение температуры воздуха в ночное время за счет излучения тепла Земли при наблюдаемой отрицательной фазе, и увеличивает температуру в ночное время, но в связи с отсутствием существенного притока солнечной энергии в дневное время наблюдается общее ее понижение.

### Заключение

Таким образом, за исследуемый период 2004–2014 гг. в летний сезон над центральной частью Якутии взаимосвязь АОТ и ПТВ проявляется по-разному. В основном корреляционная связь положительна, что говорит об относительно прозрачной атмосфере над исследуемым регионом. Однако проведенный сравнительный анализ двух периодов со схожей временной динамикой АОТ в июле 2005 г. и июне 2011 г. показал, что очаги возгорания лесного массива, сопровождающиеся фотохимическим смогом (дымы), способны привести к аэрозольному помутнению атмосферы. Наряду с этим при наличии отрицательной

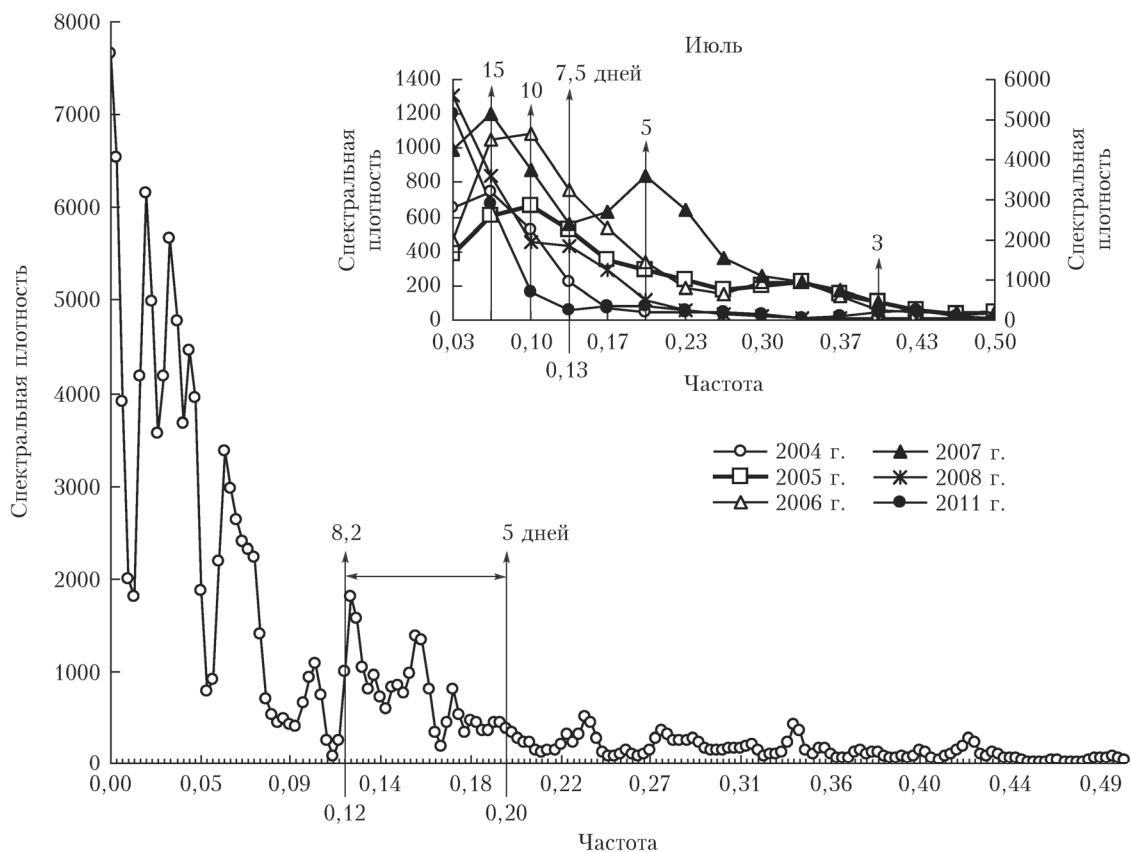


Рис. 4. Общий спектральный анализ средних среднесуточных значений УДР (NCEP/NCAR) за июль 2004–2014 гг. Для примера на фрагменте дополнительно приведен график спектрального анализа среднесуточных значений УДР за июль в различные годы (отображены не все годы исследования). По горизонтальным осям показана частота, соответствующая определенным периодам (сутки)

фазы УДР, обеспечивающей повышение ночной температуры воздуха, в целом наблюдается ее понижение за счет существенного спада НПСР в дневное время.

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

1. Кондратьев К.Я. Аэрозоль как климатообразующий компонент атмосферы. 2. Прямое и косвенное воздействие на климат // Оптика атмосф. 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 // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 7. С. 565–575.
3. Чекман И.С., Сырская А.О., Андреева С.В., Макаров В.А. Аэрозоли – дисперсные системы: монография. Харьков: Цифровая друкарня № 1, 2013. 100 с.
4. Haywood J., Boucher O. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosol: A review // Rev. Geophys. 2000. V. 38, N 4. P. 513–543.
5. Twomey S. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds // J. Atmos. Sci. 1977. V. 34, N 7. P. 1149–1152.
6. Albrecht B. Aerosol, cloud microphysics, and fractional cloudiness // Sci. 1989. V. 245, N 4923. P. 1227–1230.
7. Johnson B., Shine K., Forster P. The semi-direct aerosol effect: Impact of absorbing aerosols on marine stratocumulus // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 2004. V. 130, N 599. P. 1407–1422.

mulus // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 2004. V. 130, N 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. ... докт. физ.-мат. наук: 25.00.30. Душанбе, 2014. 315 с.
9. Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakajima T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A. AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization // Remote Sens. Environ. 1998. V. 66, N 1. P. 1–16.
10. Dubovik O., Smirnov A., Holben B.N., King M.D., Kaufman Y.J., Eck T.F., Slutsker I. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) sun and sky-radiance measurements // J. Geophys. Res. D. 2000. V. 105, N 8. P. 9791–9806.
11. Исследование радиационных характеристик аэрозоля в азиатской части России / Под общей ред. С.М. Сакерина. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2012. 484 с.
12. Penner J.E., Xu L., Wang M. Satellite methods underestimate indirect climate forcing by aerosols // Proc. National Academy Sci. 2011. V. 108, iss. 33. P. 13404–13408.
13. Kistler R., Kalnay E., Collins W., Saha S., White G., Woollen J., Chelliah M., Ebisuzaki W., Kanamitsu M., Kousky V., van den Dool H., Jenne R., Fiorino M. The NCEP-NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means

- CD-ROM and Documentation // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2001. V. 82, N 2. P. 247–267.
14. *ECMWF Newsletter No. 110 – Winter 2006/07* / Ed. by B. Riddaway. Reading: European Center for Medium-Range Weather Forecast, 2007. P. 53.
  15. *Васильев М.С., Николашкин С.В., Каримов Р.Р.* Сравнение приземной температуры воздуха в Якутии по данным реанализа и наземных наблюдений // *Вестн. СВФУ*. 2014. Т. 11, № 5. С. 82–88.
  16. *Васильев М.С., Николашкин С.В., Каримов Р.Р.* Временная изменчивость приземной температуры воздуха в Якутии во время крупных Форбуш-понижений // *Вестн. СВФУ*. 2014. Т. 11, № 6. С. 19–29.
  17. *Chahine M., Barnet C., Olsen E.T., Chen L., Maddy E.* On the determination of atmospheric minor gases by the method of vanishing partial derivatives with application to CO<sub>2</sub> // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. L22803. DOI: 10.1029/2005GL024165.
  18. *Кухарский А.В., Успенский А.Б.* Определение средней концентрации атмосферного диоксида углерода в тропосфере по данным спутникового ИК-зондировщика высокого спектрального разрешения // *Метеорол. и гидрол.* 2009. № 4. С. 15–28.
  19. *Васильев М.С., Николашкин С.В., Решетников А.А., Титов С.В.* Взаимосвязь вариаций температуры воздуха и содержания аэрозоля в центральной Якутии в летнее время // *Аэрозоли Сибири. XXI Рабочая группа: Тезисы докл.* Томск: ИОА СО РАН, 2014. С. 57.
  20. *Васильев М.С., Николашкин С.В.* Влияние аэрозоля на температуру воздуха в летний сезон над центральной частью Якутии // *Оптика атмосф. и океана. Физика атмосферы: Тезисы докл. XXI Междунар. симп.* Томск: ИОА СО РАН, 2015. С. 115.
  21. *Васильев М.С., Николашкин С.В.* Влияние аэрозоля на температуру воздуха в летний сезон над центральной частью Якутии // *Оптика атмосф. и океана. Физика атмосферы: материалы XXI Междунар. симп.* [Электронный ресурс]. Томск: ИОА СО РАН, 2015. 1 CD ROM. С. D101–D104.
  22. *Матющенко Ю.Я., Павлов В.Е.* Малоугловые аэрозольные и облачные образования на фоне преобладающей безоблачной атмосферы // *Межрегиональный экологический форум: Сб. мат. форума.* Барнаул, 2004. С. 138–141.
  23. *Павлов В.Е., Зацепин П.М., Матющенко Ю.Я.* Отбор безоблачных ситуаций по данным AERONET // *Аэрозоли Сибири. XI Рабочая группа.* Томск: ИОА СО РАН, 2004. С. 17.
  24. *Васильев М.С., Каримов Р.Р.* Исследование возможных причин возникновения лесных пожаров в Якутии по данным дистанционных наблюдений // *В мире научных открытий.* Красноярск: Научно-инновационный центр, 2014. № 4(52). С. 161–171.
  25. *Draxler R.R., Rolph G.D.* HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) / Model access via NOAA ARL READY. NOAA Air Resources Laboratory, College Park, MD. 1997. URL: <http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>
  26. *Советско-американский эксперимент по изучению аридного аэрозоля* / Под ред. Г.С. Голицына. СПб.: НПО «Тайфун», 1992. 208 с.
  27. *Оке Т.Р.* Климаты пограничного слоя. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 359 с.
  28. *Bach W., Crane A.J.* Carbon dioxide: Current views and developments in energy // *Climate Res. 2nd Course of the International School of Climatology, Ettore Majorana Centre for Scientific Culture, Erice, Italy, July 16–26.* 1982. P. 16.
  29. *Сидоренко Н.С.* Атмосферные процессы и вращение Земли. СПб.: Гидрометеоиздат, 2002. 366 с.
  30. *Сидоренко Н.С.* Лунно-солнечные приливы и атмосферные процессы // *Природа.* 2008. № 2. С. 23–31.
  31. *Мультиановский Б.П.* Основные положения синоптического метода долгосрочных прогнозов погоды. М.: ЦУЕГМС, 1933. 139 с.

***M.S. Vasiliev, S.V. Nikolashkin. Temperature effect of smoke aerosol in the summer season over the central part of Yakutia for the period 2004–2014.***

In the current work, the result of an investigation of temperature effect of smoke 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 regular meteorological observations and aerological and satellite informations are used.

It is first showed that a disturbance of atmosphere by aerosol particles which is caused by heat sources of forest area lead to a decrease of solar radiation flow, and, in the presence of a negative phase of upward long-wave radiation, a surface air temperature drop is observed.