2. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ

УДК 551.524.35; 551.510.42; 551.510.411.35

DOI: 10.23885/2500-395X-2020-1-5-101-105

О КЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ АТМОСФЕРЫ И АЛЬБЕДО ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ В РОССИЙСКОЙ АРКТИКЕ В АПРЕЛЕ

А.А. Виноградова¹, Т.Б. Титкова²

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

²Институт географии РАН

anvinograd@yandex.ru, ttitkova@yandex.ru

Аннотация. Анализируется изменчивость температуры приземного воздуха в зависимости от вариаций потока падающей радиации, альbedo подстилающей поверхности, содержания черного углерода в столбе атмосферы, а также от количества твердых и жидких осадков – в четырех тестовых районах вблизи арктического побережья европейской и азиатской частей России. Используются данные реанализа спутниковой информации и измеренных величин MERRA-2 и WATCH для апреля 2010–2016 годов. Изучаются изменения суточных значений указанных параметров в течение месяца (тренды), а также от дня ко дню. Изменчивость и корреляция рассматриваемых величин анализируются с применением многофакторных регрессионных соотношений. Также оценены возможные изменения радиационного форсинга за счет статистических колебаний величины альbedo поверхности в течение апреля в разных районах Российской Арктики.

Ключевые слова: климат, атмосфера, Арктика, альbedo поверхности, черный углерод, метеорологические параметры, множественная линейная регрессия

Регулярные наблюдения за составом и свойствами атмосферы в Российской Арктике сильно затруднены ее удаленностью и труднодоступностью. Однако климатическая значимость Арктики для всего Северного полушария подтверждена неоднократно [1–3]. Связь содержания черного углерода (black carbon – BC) в атмосфере, температуры воздуха и альbedo поверхности изучалась пока только в отдельных работах, в основном в высокогорных районах, поскольку на большей части поверхности Земли она сильно замаскирована другими эффектами (осадки, облачность, качество снега и т.д.). Кроме того, в [4] подчеркивается, что для конкретного места и конкретного дня различить чистый снег и снег, содержащий BC, по дистанционным наблюдениям достаточно трудно. А реальных измерений альbedo и BC в атмосфере в труднодоступных районах практически нет. Поэтому оценки (в основном, модельные) влияния BC в снеге на радиационный форсинг вблизи поверхности, выполненные разными авторами, различаются на порядки [5, 6]. Практически чистый натурный эксперимент, выполненный по спутниковым данным для площадки в горах Тибета, где весной много солнца и лежит снег, описан в [4]. Но и в этом случае авторы анализировали среднемесячные данные.

В настоящей работе сделана попытка выявить закономерности временной изменчивости ряда климатических параметров атмосферы и подстилающей поверхности по данным реанализа (MERRA-2 и WATCH) накопленной информации дистанционных и реальных наблюдений. Изучаются временные вариации ежедневных значений альbedo поверхности (A), содержания черного углерода (black carbon – BC) в столбе атмосферы, потока приходящей коротковолновой солнечной радиации (SW) вблизи поверхности, температуры приземного воздуха (T), а также количества твердых (S) и жидких (R) осадков. Рассмотрены четыре тестовых района вблизи арктического побережья европейской и азиатской частей России: на Колском п-ве, КП (67–68° с.ш., 36–39° в.д.), в Ненецком АО, НАО (66,5–68° с.ш., 54–58° в.д.), на Гыданском п-ове, ГП (69,5–71° с.ш., 74,5–77,5° в.д.), в нижнем течении р. Лена, НЛ (70,5–72° с.ш., 125,5–127° в.д.) – карта на рис. 1. Обсуждаются физические процессы и механизмы, которые могут связывать величины рассматриваемых параметров и влиять на радиационные эффекты в системе «атмосфера–поверхность».

Климатические аспекты поставленной задачи диктуют изучение рассматриваемых параметров в условиях, когда их вариации могут максимально проявиться в радиационных эффектах, то есть

при достаточно длительном и значительном потоке падающей солнечной радиации, но при покрытой снегом/льдом подстилающей поверхности. Анализ проводился по ежедневным значениям параметров для апреля за 2010–2016 годы, поскольку в мае вблизи

70-ой широты снежный покров уже сходит, а в марте солнце только появляется из-за горизонта после полярной ночи. Значения А и ВС анализировались для дневного времени суток при максимальной высоте солнца – с 11 до 15 часов по местному времени.

Рис. 1. Расположение тестовых районов: на Кольском п-ве (КП), в Ненецком АО (НАО), на Гыданском п-ове (ГП), в нижнем течении реки Лена (НЛ)

Данные о содержании ВС в столбе атмосферы и о значениях альбедо поверхности были получены на сайте <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/> с помощью моделей M2T1NXAER и M2T1NXRAD, соответственно, продукта реанализа MERRA-2. Разрешение по площади $0.5^\circ \times 0.625^\circ$ и по времени 1 час. MERRA-2 – это реанализ атмосферных данных NASA для спутниковой эры с использованием модели системы наблюдения Goddard Earth, версия 5 (GEOS-5) с ее алгоритмами ассимиляции атмосферных данных (ADAS), версия 5.12.4 (см. сайт).

Метеорологические параметры (Т, S, R и SW) анализировались по данным реанализа WATCH [7] сайта <http://www.eu-watch.org/>, который является продуктом проекта Европейского союза «Water and Global Change», объединившего гидрологические и климатические данные для их количественной оценки. Разрешение по времени 3 часа и по пространству $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. Надежные данные представлены на сайте по 2016 год включительно, что определило годы, для которых проводятся исследования в данной работе.

Таблица 1. Средние значения $\pm$ СКО рассматриваемых параметров в апреле 2010–2016 годов.

Район	Температура воздуха Т, °С	Падающая коротковолновая радиация SW, Вт/м ²	Альбедо, А	ВС в столбе, 10^{-7} кг/м ²	Жидкие осадки R, мм/мес	Твердые осадки S, мм/мес
КП	$-0,5 \pm 2,9$	262 ± 30	$0,51 \pm 0,03$	$5,0 \pm 2,2$	19	21
НАО	$-2,3 \pm 3,5$	260 ± 31	$0,53 \pm 0,08$	$5,0 \pm 1,5$	22	24
ГП	$-8,1 \pm 5,8$	244 ± 37	$0,59 \pm 0,03$	$4,8 \pm 1,7$	7,0	20
НЛ	$-13,1 \pm 6,2$	203 ± 29	$0,57 \pm 0,02$	$6,0 \pm 2,8$	0,0	15

При анализе вариаций всех параметров для каждой территории использовались как простая парная корреляция, так и метод многопараметрической линейной регрессии, позволяющий рассчитать величины коэффициентов связи различных параметров в их совокупности и оценить достоверность и значимость этих коэффициентов. Кроме того, поскольку в апреле в зависимостях среднесуточных величин

А, ВС, Т и SW от времени наблюдаются линейные тренды, корреляционный и регрессионный анализ вариаций был повторен после удаления трендов этих характеристик за месяц (с сохранением среднемесячных значений для каждого года и района). В последнем случае анализировались вариации величин только на масштабах меньше месяца (в т.ч. межсуточные вариации).

В табл. 1 приведены средние значения всех рассматриваемых параметров для каждой площадки за апрель 2010–2016 годов. При продвижении с запада на восток вдоль Российского побережья Северного Ледовитого океана (СЛО) воздух становится холоднее. Альbedo самое высокое в районе ГП (самая северная территория, где много снега), а самое низкое – в районе КП, где средняя T в апреле уже около 0°C и снег протаивает с образованием площадок с низким A .

Содержание BC в столбе атмосферы вдоль побережья СЛО изменяется в пределах $\pm 10\%$ от среднего, с наибольшим значением в районе НЛ. На европейских территориях (КП, НАО) количество твердых и дождевых осадков в апреле почти одинаково, тогда как в азиатской части (ГП, НЛ) снег ещё заметно преобладает. Меньше всего солнечной радиации поступает к поверхности в районе НЛ, что может быть связано с частой облачностью и туманами, характерными для этой части побережья СЛО.

Таблица 2. Результаты линейного регрессионного анализа вариаций пяти параметров – A (безразмерная величина), BC ($\text{кг}/\text{м}^2$), R ($\text{мм}/\text{сут}$), S ($\text{мм}/\text{сут}$), SW ($\text{Вт}/\text{м}^2$) – по отношению к величине приземной температуры T ($^{\circ}\text{K}$). В уравнения включены параметры с уровнем значимости выше 95 %.

Район	Уравнение регрессии	Множественный коэффициент корреляции
	Исходные данные без коррекции трендов	
КП	$T=279,2-41,9^{\circ}\text{A}-0,33^{\circ}\text{S}+0,055^{\circ}\text{SW}$	0,85
НАО	$T=258,7-7,42^{\circ}\text{A}+2751725^{\circ}\text{BC}+0,63^{\circ}\text{R}-0,78^{\circ}\text{S}+0,056^{\circ}\text{SW}$	0,69
ГП	$T=264,3-54,2^{\circ}\text{A}+3585756^{\circ}\text{BC}+0,127^{\circ}\text{SW}$	0,90
НЛ	$T=284,5-93,7^{\circ}\text{A}+0,143^{\circ}\text{SW}$	0,82
Тренды A , BC , T и SW удалены		
КП	$T=276,7-36,3^{\circ}\text{A}+1037466^{\circ}\text{BC}-0,31^{\circ}\text{S}+0,054^{\circ}\text{SW}$	0,77
НАО	$T=255,3-4,82^{\circ}\text{A}+0,49^{\circ}\text{R}-0,66^{\circ}\text{S}+0,066^{\circ}\text{SW}$	0,72
ГП	$T=178,6+91,2^{\circ}\text{A}-1,3^{\circ}\text{R}+0,115^{\circ}\text{SW}$	0,57
НЛ	$T=285,3-88,3^{\circ}\text{A}+0,126^{\circ}\text{SW}$	0,69

Поправки к температуре, рассчитанные по формулам табл. 2 при изменениях каждого параметра в пределах СКО, не превышают 5°K (как в течение месяца, так и на меньших масштабах). Максимальные изменения T вызывают, конечно, вариации SW , особенно в более холодных районах ГП и НЛ ($4,7^{\circ}\text{K}$ и $4,2^{\circ}\text{K}$, соответственно). Уменьшение A связано с увеличением T , что естественно ассоциируется с упомянутыми выше весенними изменениями качества поверхности [8]. Однако в районе ГП проявляется неоднозначность взаимодействия A и T : на временных масштабах меньше месяца знак коэффициента при A положителен, что требует дополнительного анализа.

Статистический анализ величин A позволяет сделать оценки вариаций радиационного форсинга альbedo поверхности RF_A для рассматриваемых площадок в Российской Арктике, считая, что $\text{RF}_A = \text{SW} \times A$.

Вариации A в апреле составили от 3,5 % в районе НЛ до 15 % в районе НАО (табл. 1). Таков же разброс относительных изменений радиационного форсинга альbedo. Здесь учтены как изменения альbedo в течение месяца, так и межсуточные колебания его величины. Абсолютные величины вариаций радиационного форсинга в апреле за счет изменений альbedo поверхности составляют от $4 \text{ Вт}/\text{м}^2$ в районе НЛ до $21 \text{ Вт}/\text{м}^2$ в районе НАО (рис. 2). Таким образом, в НАО вариации

радиационного форсинга более чем вдвое выше, чем в других районах вблизи российского побережья СЛО, что соответствует результатам [8]. При этом район НАО мало отличается от других по величине падающего солнечного излучения и его вариациям.

Рис. 2. Вариации радиационного форсинга за счет изменений альbedo поверхности в разных районах побережья СЛО.

Таким образом, результаты проведенного анализа позволяют оценить изменчивость ряда климатических параметров атмосферы и альbedo подсти-

лающей поверхности в апреле в разных районах Российской Арктики. Это необходимо для модельных расчетов и климатических оценок. Трактовка полученных зависимостей и корреляций с точки зрения физических механизмов тех или иных связей

рассматриваемых характеристик – вопрос очень сложный и требует дополнительных исследований.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты №№ 18-05-60183, 18-05-60216.

Список литературы:

1. AMAP Assessment 2015: Black carbon and ozone as Arctic climate forcers. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo, Norway, 2015. 116 p. ISBN 978-82-7971-092-9
2. Tomasi C., Kokhanovsky A., Lupi A., Ritter C., Smirnov A., O'Neill N.T., Stone R.S., Holben B.N., Nyeki S., Wehrli C., Stohl A., Mazzola M., Lanconelli C., Vitale V., Stebel K., Aaltonen V., de Leeuw G., Rodriguez E., Herber A.B., Radionov V.F., Zielinski T., Petelski T., Sakerin S.M., Kabanov D.M., Xue Y., Mei L., Istomina L., Wagener R., McArthur B., Sobolewski P.S., Kivi R., Courcoux Y., Larouche P., Broccardo S. and Piketh S.J. Aerosol remote sensing in polar region // *Earth-Science Reviews*. 2015. V. 140. P. 108–115.
3. Журавлева Т.Б., Насртдинов И.М., Виноградова А.А. Прямые радиационные эффекты дымового аэрозоля в районе ст. Тикси (Российская Арктика): предварительные результаты // *Оптика атмосферы и океана*. 2019. Т. 32. № 1. С. 29–38
4. Lee W.-L., Liou K.N., He C., Liang H.-C., Wang T.-C., Li Q., Liu Z. and Yue Q. Impact of absorbing aerosol deposition on snow albedo reduction over the southern Tibetan plateau based on satellite observations // *Theor. Appl. Climatol.* 2017. V. 129. N 3–4. P. 1373–1382. DOI: 10.1007/s00704-016-1860-4
5. Bond T.C., Doherty S.J., Fahey D.W., Forster P.M., Berntsen T., DeAngelo B.J., Flanner M.G., Ghan S., Kärcher B., Koch D., Kinne S., Kondo Y., Quinn P.K., Sarofim M.C., Schultz M.G., Schulz M., Venkataraman C., Zhang H., Zhang S., Bellouin N., Guttikunda S.K., Hopke P.K., Jacobson M.Z., Kaiser J.W., Klimont Z., Lohmann U., Schwarz J.P., Shindell D., Storelvmo T., Warren S.G. and Zender C.S. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2013. V. 118. N. 11. P. 5380–5552.
6. Quinn P.K., Bates T.S., Baum E., Doubleday N., Fiore A.M., Flanner M., Fridlind A., Garrett T.J. and Koch D. Short-lived pollutants in the Arctic: Their climate impact and possible mitigation strategies // *Atmos. Chem. Phys.* 2008. V. 8. P. 1723–1735.
7. Harding R., Best M., Blyth E., Hagemann S., Kabat P., Tallaksen L.M., Warmaars T., Wiberg D., Weedon G.P., Lanen H.A.J., Ludwig F., Haddeland I. WATCH: Current knowledge of the Terrestrial global water cycle // *J. Hydrometeorol.* 2011. V. 12, N 6. P. 1149–1156. DOI: 10.1175/JHM-D-11-024.1
8. Виноградова А.А., Туткова Т.Б. Черный углерод в атмосфере и альbedo подстилающей поверхности в Российской Арктике весной // *Оптика атмосферы и океана*. 2020. Т. 33. № 1. С. 61–67.

ON CLIMATE ATMOSPHERIC PARAMETERS AND SURFACE ALBEDO IN THE RUSSIAN ARCTIC IN APRIL

A.A. Vinogradova^a, T.B. Titkova^b

^aA.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^bInstitute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

anvinograd@yandex.ru, ttitkova@yandex.ru

Abstract. We study four test areas near the Arctic Russian coast of Eurasia in April 2010–2016. The near surface air temperature was studied in relation to values of solar incident radiation, surface albedo, column content of black carbon in the atmosphere, and the amount of solid and liquid precipitation. The data from two systems of satellite information and measured values reanalysis – MERRA-2 and WATCH – are used. We also study variability in daily averaged values of those parameters in a monthly scale (trends), as well in day-to-day scale by the method of multiple linear regression in their influence on the air surface temperature. The amendments in albedo radiative effect were estimated for different areas of the Russian Arctic in April. Variations in albedo ranged from 3.5 % near NL region to 15 % near NAO one. Absolute values of radiation forcing due to these surface albedo variations are from 4 W/m² to 21 W/m², respectively. At the same time, the area of NAO differs little from others in terms of the amount of incident solar radiation and its variations. The interpretation of obtained dependencies and correlations in terms of physical mechanisms or certain connections is a very complicated issue and requires additional research.

Keywords: climate, atmosphere, the Arctic, surface albedo, black carbon, meteorological parameters, multiple linear regression

References:

1. AMAP Assessment 2015: Black carbon and ozone as Arctic climate forcers. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo, Norway, 2015. 116 p. ISBN 978–82-7971–092-9
2. Tomasi C., Kokhanovsky A., Lupi A., Ritter C., Smirnov A., O'Neill N.T., Stone R.S., Holben B.N., Nyeki S., Wehrli C., Stohl A., Mazzola M., Lanconelli C., Vitale V., Stebel K., Aaltonen V., de Leeuw G., Rodriguez E., Herber A.B., Radionov V.F., Zielinski T., Petelski T., Sakerin S.M., Kabanov D.M., Xue Y., Mei L., Istomina L., Wagener R., McArthur B., Sobolewski P.S., Kivi R., Courcoux Y., Larouche P., Broccardo S. and Piketh S.J. Aerosol remote sensing in polar region // *Earth-Science Reviews*. 2015. V. 140. P. 108–115.
3. Zhuravleva T.B., Nasrtdinov I.M. and Vinogradova A.A. Direct Radiative Effects of Smoke Aerosol in the Region of Tiksi Station (Russian Arctic): Preliminary Results // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2019. V. 32. N 3. P. 296–305. DOI: 10.1134/S1024856019030187
4. Lee W.-L., Liou K.N., He C., Liang H.-C., Wang T.-C., Li Q., Liu Z. and Yue Q. Impact of absorbing aerosol deposition on snow albedo reduction over the southern Tibetan plateau based on satellite observations // *Theor. Appl. Climatol.* 2017. V. 129. N 3–4. P. 1373–1382. DOI: 10.1007/s00704–016-1860–4
5. Bond T.C., Doherty S.J., Fahey D.W., Forster P.M., Berntsen T., DeAngelo B.J., Flanner M.G., Ghan S., Kärcher B., Koch D., Kinne S., Kondo Y., Quinn P.K., Sarofim M.C., Schultz M.G., Schulz M., Venkataraman C., Zhang H., Zhang S., Bellouin N., Guttikunda S.K., Hopke P.K., Jacobson M.Z., Kaiser J.W., Klimont Z., Lohmann U., Schwarz J.P., Shindell D., Storelvmo T., Warren S.G. and Zender C.S. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2013. V. 118. N. 11. P. 5380–5552.
6. Quinn P.K., Bates T.S., Baum E., Doubleday N., Fiore A.M., Flanner M., Fridlind A., Garrett T.J. and Koch D. Short-lived pollutants in the Arctic: Their climate impact and possible mitigation strategies // *Atmos. Chem. Phys.* 2008. V. 8. P. 1723–1735.
7. Harding R., Best M., Blyth E., Hagemann S., Kabat P., Tallaksen L.M., Warnaars T., Wiberg D., Weedon G.P., Lanen H.A.J., Ludwig F., Haddeland I. WATCH: Current knowledge of the Terrestrial global water cycle // *J. Hydrometeorol.* 2011. V. 12, N 6. P. 1149–1156. DOI: 10.1175/JHM-D-11-024.1
8. Vinogradova A.A. and Titkova T.B. Atmospheric Black Carbon and Surface Albedo in the Russian Arctic in Spring // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2020. V. 33. N. 3. P. 260–266. DOI: 10.1134/S1024856020030136