

## ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.521.14; 551.510.42; 551.582.2

# Черный углерод в атмосфере и альbedo подстилающей поверхности в Российской Арктике весной

А.А. Виноградова<sup>1</sup>, Т.Б. Титкова<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> *Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН  
119017, г. Москва, пер. Пыжевский, 3*

<sup>2</sup> *Институт географии РАН  
119017, г. Москва, пер. Старомонетный, 29*

Поступила в редакцию 27.09.2019 г.

Исследуются статистические связи между содержанием черного углерода (black carbon – BC) в столбе атмосферы и альbedo ( $A$ ) подстилающей поверхности, величины которых получены из данных реанализа MERRA-2 для четырех тестовых районов вблизи арктического побережья России в апреле 2010–2016 гг. В анализ включены также метеопараметры атмосферы: температура воздуха, количество жидких и твердых осадков. Статистический анализ проводился по среднесуточным значениям параметров. Повышение температуры воздуха везде сопровождается понижением альbedo поверхности – как в масштабах месяца, так и в ежедневных вариациях. Осадки в виде свежего снега повышают альbedo поверхности. В целом за 7 лет значимая отрицательная корреляция между BC и  $A$  в апреле обнаружена в Ненецком автономном округе и на Гыданском п-ове. Выявлены отдельные годы (в общем случае различные для разных районов), когда коррелируют межсуточные вариации  $A$  и BC в пределах месяца, также с отрицательными коэффициентами. Оценены возможная изменчивость альbedo за счет вариаций разных параметров и изменения его радиационного форсинга.

*Ключевые слова:* Арктика, климат, атмосфера, черный углерод, альbedo поверхности, метеопараметры, множественная линейная регрессия; the Arctic, climate, atmosphere, black carbon, surface albedo, meteorological parameters, multiple linear regression.

### Введение

В последнее десятилетие черный углерод (black carbon – BC) в атмосфере изучается едва ли не интенсивнее, чем все другие составляющие, в связи с его влиянием на радиационные характеристики атмосферы и на радиационный баланс системы «атмосфера – поверхность» [1, 2]. Ввиду особой значимости Арктики для климата всего Северного полушария [3, 4] в этом регионе развернуты работы по изучению состава и свойств атмосферы [5–8], в том числе – именно для климатических задач.

Альbedo поверхности ( $A$ ) – показатель ее отражательной способности, отношение интенсивностей отраженного и падающего излучения. Чем выше  $A$ , тем больше излучения отражается и тем меньше энергии падающего излучения идет на нагрев поверхности. Величина альbedo зависит от качества поверхности (растительности, почвы, снега и т.д.) и сезона.

Черный углерод, находящийся в составе атмосферных аэрозолей, влияет на радиационные свойства системы «атмосфера – поверхность» разными способами: поглощает излучение, нагревая атмосферу (прямой эффект), способствует росту размеров

аэрозольных частиц и образованию капель и облаков (непрямые эффекты). Кроме того BC, осаждаясь на поверхность, может изменять ее альbedo, увеличивая поглощательную способность и обеспечивая дополнительный прогрев.

Связь атмосферного BC и  $A$  изучалась пока только в отдельных работах (см. [9] и литературу к ней) и в основном в высокогорных районах, поскольку на большей части поверхности Земли она сильно замаскирована другими эффектами (осадками, облачностью, качеством снега, сложной орографией, мозаичностью поверхности и т.д.). Кроме того, в [9] подчеркивается, что по дистанционным наблюдениям для конкретного места и конкретного дня различить чистый снег и снег, содержащий BC, достаточно трудно. А реальных измерений  $A$  и BC в атмосфере в труднодоступных районах практически нет. Поэтому оценки (в большинстве своем модельные) влияния BC в снеге на радиационный форсинг вблизи поверхности, выполненные разными авторами, различаются на порядки [2, 10]. Результаты [9] – практически чистый натуральный эксперимент, выполненный по спутниковым данным, для площадки в горах Тибета, где весной много солнца и лежит снег. Но даже в этих условиях авторы анализируют среднемесячные показатели.

Настоящая работа посвящена анализу временных вариаций ежедневных значений альbedo

\* Анна Александровна Виноградова (anvinograd@yandex.ru); Татьяна Борисовна Титкова (ttitkova@yandex.ru).

поверхности и содержания ВС в столбе атмосферы с целью накопления информации и прояснения вопросов, связанных с влиянием атмосферного ВС на  $A$  в течение апреля в Российской Арктике. Привлечены также данные о температуре воздуха и количестве осадков. Выполнены оценки средних значений рассматриваемых параметров, их трендов, анализируются корреляции колебаний всех параметров как в межгодовых вариациях, так и на более коротких временных интервалах в пределах месяца. Также оценена чувствительность альbedo к изменениям остальных величин и масштаб возможных изменений радиационного форсинга за счет вариаций  $A$ .

### Тестовые районы и исходные материалы

Исследовались четыре тестовых района в Российской Арктике: на Кольском п-ове, 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. Лены, НЛ (70,5–72° с.ш., 125,5–127° в.д.) – карта на рис. 1. Эти площадки расположены на материке, не слишком далеко на север – примерно в полосе 65–70° с.ш., чтобы туда мог поступать атмосферный ВС антропогенного происхождения [11]; они имеют преимущественно равнинный рельеф для минимизации колебаний величины альbedo в пределах каждой тестируемой территории. Представлены как европейская, так и азиатская части севера России, климатические условия которых принципиально различны [12].

Климатические аспекты поставленной задачи предполагают изучение процессов в условиях, когда вариации атмосферного ВС и  $A$  могут максимально проявиться в радиационных эффектах, т.е. при достаточно длительном и значительном потоке падаю-

щей солнечной радиации, но при покрытой снегом/льдом поверхности. Отсюда – выбор времени года и времени суток. Анализ проводился по ежедневным значениям параметров для апреля 2010–2016 гг., поскольку в мае на этих широтах снежный покров уже сходит, а в марте солнце только появляется из-за горизонта после полярной ночи. Значения  $A$  и ВС анализировались для дневного времени суток при максимальной высоте солнца – с 11:00 до 15:00 по местному времени.

Данные о содержании ВС в столбе атмосферы и  $A$  были получены на сайте [13] с помощью моделей M2T1NXAER и M2T1NXRAD соответственно продукта реанализа MERRA-2 [14]. Разрешение по площади –  $0,5^\circ \times 0,625^\circ$ , по времени – 1 ч. MERRA-2 – это реанализ атмосферных данных NASA для спутниковой эры с использованием модели системы наблюдения Goddard Earth, версия 5 (GEOS-5) с ее системой ассимиляции атмосферных данных (ADAS), версия 5.12.4. Подробное описание процедуры вычисления  $A$  приведено в материалах [15]. Для анализа выбраны данные с 2010 г., для которых есть результаты измерений концентрации ВС в приземном воздухе на ст. Тикси (вблизи площадки НЛ, используемой в нашей работе). Сверка результатов реанализа с измерениями на станции показала хорошее соответствие среднемесячных величин [16].

Использовались метеорологические параметры с сайта WATCH [17], который является продуктом проекта Европейского союза “Water and Global Change” [18], объединившего гидрологические и климатические данные для их количественной оценки. Разрешение реанализа по пространству –  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ . Снег в этой базе данных рассматривается отдельно от жидких осадков. К анализу привлечены следующие параметры: среднесуточная температура воздуха на уровне 2 м ( $T$ ), количество осадков в жидком ( $R$ ) и твердом ( $S$ ) виде за сутки, мм/сут.

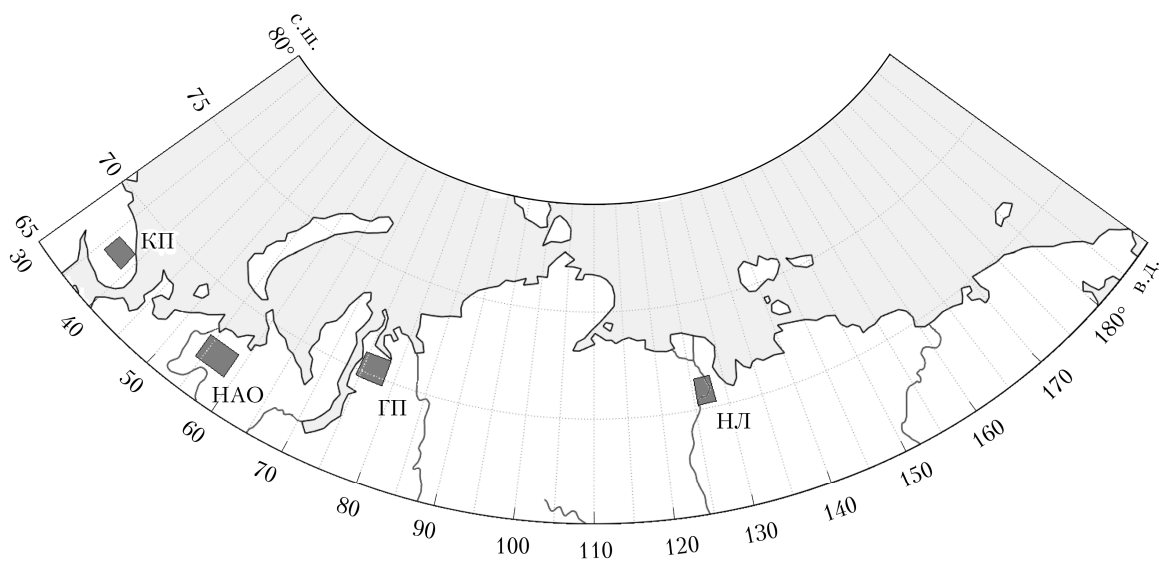


Рис. 1. Расположение тестовых районов: на Кольском п-ове (КП), в Ненецком АО (НАО), на Гыданском п-ове (ГП), в нижнем течении р. Лены (НЛ)

Данные на сайте [17] представлены по 2016 г. включительно, что определило годы, для которых проводятся исследования в настоящей работе.

При анализе вариаций всех параметров для каждой территории использовались как простая парная корреляция, так и метод многопараметрической линейной регрессии, позволяющий рассчитать коэффициенты связи различных параметров в их совокупности и оценить достоверность и значимость этих коэффициентов. Кроме того, поскольку в зависимостях среднесуточных величин  $A$ ,  $BC$  и  $T$  от времени за каждый месяц для каждого района наблюдаются линейные тренды, корреляционный и регрессионный анализ вариаций был повторен после удаления трендов этих характеристик (с сохранением среднемесячных значений).

### Анализ вариаций среднемесячных величин рассматриваемых параметров

В табл. 1 приведены средние за 2010–2016 гг. значения рассматриваемых параметров в апреле для четырех тестируемых территорий. Рассмотрим основные пространственные закономерности изменения этих параметров (см. рис. 1). Видно, что воздух становится холоднее при продвижении с запада на восток вдоль российского побережья Северного Ледовитого океана. Альbedo самое высокое в районе ГП (самая северная из территорий) и самое низкое в районе КП, где средняя температура воздуха в апреле уже около  $0^\circ\text{C}$  и погодные условия должны способствовать протаиванию снега на поверхности с образованием площадок с низким  $A$ .

Среднее (за месяц) содержание  $BC$  в столбе атмосферы вдоль побережья СЛО изменяется в пределах  $\pm 10\%$ . На европейских территориях (КП и НАО) количество снежных осадков и дождей почти одинаково, тогда как в азиатской части (ГП и НЛ) снег еще заметно преобладает. Данные последнего столбца табл. 1 из [19] свидетельствуют о том, что в апреле везде еще лежит снег, хотя по данным о температуре воздуха можно предположить, что качество его различно: от более мокрого и подтаивающего снега на КП до качественно более соответствующего зимним месяцам на ГП и НЛ.

Рассмотрим результаты попарного корреляционного анализа изучаемых характеристик (табл. 2).

Для данных табл. 2 порог 5% статистической значимости коэффициента корреляции, рассчитанного по 210 парам значений, составляет 0,14 [20]. Надежная отрицательная корреляция между  $A$  и  $T$  на всех площадках однозначно указывает на соответствие понижения альbedo поверхности повышению температуры воздуха. В апреле это довольно очевидно, поскольку весной рост температуры происходит более или менее монотонно во всех рассматриваемых районах и ведет к подтаиванию и повышению зернистости и пористости снега, появлению на поверхности участков открытой от снега почвы и растительности, что, в свою очередь, уменьшает альbedo. Корреляция между  $BC$  и  $T$  может быть обусловлена, например, тем, что потепление происходит из-за адвекции теплого воздуха из более южных районов, где расположены основные антропогенные источники  $BC$ . Отсутствие достоверной корреляции этой пары параметров в районе НЛ может быть связано с большой удаленностью источников  $BC$ . В районах НАО и ГП отрицательная корреляция между  $A$  и  $BC$ , скорее всего, обусловлена их попарной связью с температурой, т.е. с переносом более теплых и загрязненных воздушных масс с южных направлений, хотя нет оснований не рассматривать и влияние осадков на альbedo в этом варианте анализа не проявилось, поскольку нет отчетливых трендов количества осадков в течение месяца.

Многопараметрический регрессионный анализ дает для этого набора данных (в анализе все параметры без коррекции) результаты, представленные в табл. 3. Здесь приведены достоверные (с вероятностью больше 95%) зависимости  $A$  от рассматриваемых параметров.

Сравнивая с анализом парных корреляций, отметим, что зависимости  $A$  от  $T$  с отрицательными коэффициентами и в этом случае проявляются для всех районов. Зависимость  $A$  от  $BC$  (с отрицательным коэффициентом) при многопараметрическом анализе достоверна только на ГП. Везде, кроме НАО, проявились зависимости  $A$  от  $S$  (с положительными коэффициентами), что соответствует представлениям о повышении альbedo при выпадении на поверхность свежего чистого снега.

Таблица 1

Средние значения  $\pm$  СКО рассматриваемых параметров в разных районах в апреле 2010–2016 гг.

Район	$A$	$BC^*$ , $10^{-7}$ , кг/м <sup>2</sup>	$T$ , °C	$R$ , мм/мес	$S$ , мм/мес	Дата схода снега (50%), число мая
КП	$0,51 \pm 0,03$	$5,0 \pm 2,2$	$-0,5 \pm 2,9$	19	21	9
НАО	$0,53 \pm 0,06$	$5,0 \pm 1,5$	$-2,3 \pm 3,5$	22	24	13
ГП	$0,59 \pm 0,03$	$4,8 \pm 1,7$	$-8,1 \pm 5,8$	7,0	20	26
НЛ	$0,57 \pm 0,02$	$6,0 \pm 2,8$	$-13,1 \pm 6,2$	0,0	15	22

\* $BC$  в столбе атмосферы.

Таблица 2

**Значимые парные коэффициенты корреляции между рассматриваемыми параметрами (по всем исходным данным)**

Район	Исходные данные без коррекции			Тренды $A$ , $BC$ и $T$ удалены		
	$A-BC$	$A-T$	$BC-T$	$A-BC$	$A-T$	$BC-T$
КП		-0,65	0,27		-0,48	0,25
НАО	-0,16	-0,27	0,32			0,26
ГП	-0,26	-0,42	0,28			
НЛ		-0,52			-0,26	

Примечание. Отсутствие данных – нет достоверной связи.

Таблица 3

**Результаты линейного регрессионного анализа вариаций четырех параметров:  $BC$  (кг/м<sup>2</sup>),  $T$  (К),  $R$  (мм/сут),  $S$  (мм/сут) в отношении их влияния на  $A$  (безразмерная)**

Район	Уравнение регрессии	Множественный коэффициент корреляции $\pm$ СКО
<i>Исходные данные без коррекции</i>		
КП	$A = 2,606 - 0,0077 \cdot T + 0,0024 \cdot S$	$0,67 \pm 0,02$
НАО	$A = 2,457 - 0,0070 \cdot T + 0,012 \cdot R$	$0,31 \pm 0,10$
ГП	$A = 1,197 - 21078 \cdot BC - 0,0023 \cdot T + 0,0047 \cdot R + 0,0062 \cdot S$	$0,57 \pm 0,02$
НЛ	$A = 1,125 - 0,0021 \cdot T + 0,0043 \cdot S$	$0,59 \pm 0,02$
<i>Тренды <math>A</math>, <math>BC</math> и <math>T</math> удалены</i>		
КП	$A = 2,050 - 0,0057 \cdot T + 0,0028 \cdot S$	$0,52 \pm 0,02$
НАО	$A = 1,497 - 0,0036 \cdot T + 0,010 \cdot R$	$0,19 \pm 0,04$
ГП	$A = 0,762 - 0,0007 \cdot T + 0,0045 \cdot S$	$0,36 \pm 0,02$
НЛ	$A = 0,821 - 0,0010 \cdot T + 0,0019 \cdot S$	$0,32 \pm 0,01$

**Анализ вариаций рассматриваемых параметров на временных масштабах менее месяца**

Удаление трендов в течение месяца в зависимостях  $A$ ,  $BC$  и  $T$  от времени позволяет выявить корреляции колебаний различных параметров на масштабах меньше месяца (по межсуточным вариациям).

При сравнении со статистикой исходных данных без коррекции трендов видно, что коэффициенты парной корреляции после удаления трендов уменьшились (см. табл. 2), некоторые из них стали недостоверными (в табл. 3 отсутствуют).

Анализируя результаты многопараметрической регрессии, приведенные в табл. 3, можно сказать, что в вариациях на масштабах меньше месяца прослеживаются те же закономерности, что были выявлены без удаления трендов, но коэффициенты множественной корреляции и коэффициенты связи отдельных параметров в межсуточных вариациях ниже. Температура воздуха и осадки в виде снега сохраняют свои ведущие роли, именно с ними связаны изменения альbedo поверхности в межсуточных вариациях. Связь между  $A$  и  $BC$  после удаления

трендов становится незначимой везде. Появление в этих результатах достоверной (положительной) связи между  $A$  и  $R$  (в районах НАО и ГП) может объясняться гляцеванием снега при редких выпадениях дождя в морозных условиях (см. табл. 1 –  $T$  и  $R$  для ГП). Процессы, качественно поясняющие наличие связей между параметрами, и их знаки (в меру понимания авторов) не могут быть проверены, но мы считаем необходимым их привести как примеры возможных механизмов образования таких связей.

**Оценка изменчивости альbedo за счет вариаций разных параметров**

Зависимости альbedo от остальных параметров, приведенные в табл. 3, позволяют оценить изменчивость  $A$  за счет вариаций  $BC$ ,  $T$ ,  $R$  и  $S$  в апреле. В табл. 4 приведены результаты таких оценок, рассчитанные для максимальных отклонений рассматриваемых параметров:  $BC$  везде на  $\pm 5 \cdot 10^{-7}$  кг/м<sup>2</sup>,  $T$  на  $\pm 6$ ,  $\pm 6$ ,  $\pm 10$  и  $\pm 13$  градусов от средних значений в районах КП, НАО, ГП и НЛ соответственно;  $R$  и  $S$  везде от 0 до, соответственно, 2 мм/сут и 5 мм/сут. Коэффициенты, связывающие  $A$  с различными параметрами, можно видеть в табл. 3 в формулах (с учетом разных единиц измерений).

Таблица 4

**Максимальные отклонения  $A$ , % от среднего значения для каждого пункта, при максимальных межсуточных вариациях параметров (см. зависимости в табл. 3)**

Параметр	КП	НАО	ГП	НЛ
<i>Исходные данные без коррекции</i>				
$BC$	–	–	$\pm 1,8$	–
$T$	$\pm 9,1$	$\pm 7,9$	$\pm 3,9$	$\pm 4,9$
$R$	–	4,6	1,6	–
$S$	2,4	–	4,2	3,7
<i>Тренды <math>A</math>, <math>BC</math> и <math>T</math> удалены</i>				
$BC$	–	–	–	–
$T$	$\pm 6,7$	$\pm 4,0$	$\pm 1,2$	$\pm 2,2$
$R$	–	3,8	–	–
$S$	2,7	–	3,1	1,6

Максимальное изменение альbedo при вариациях  $BC$  наблюдается в районе ГП ( $< 2\%$  от среднего значения) за счет трендов обоих параметров в течение месяца. Изменение  $T$  оказывает максимальное влияние на  $A$  в районе КП как за счет тренда в течение месяца, так и при вариациях от дня ко дню. Видимо, сказывается тот факт, что в апреле в этом районе уже практически нулевая температура воздуха, происходит интенсивное таяние снега и обнажение более темной почвы. При этом отклик  $A$  на изменение качества поверхности в результате выпадения дождей становится достаточно быстрым. В районе НАО важны и тренды  $T$  в течение месяца, и ее межсуточные вариации. Влияние снегопадов на  $A$  – до 4% в районах КП, ГП и НЛ, а в районе НАО нет достоверной связи между  $A$  и  $S$ .

## Вариации радиационного форсинга за счет изменения альбедо

Насколько велики обнаруженные вариации  $A$  за счет изменения величин разных параметров, можно судить по влиянию этих изменений на радиационный форсинг альбедо (RF\_A) вблизи поверхности (табл. 5). Средняя для этих районов величина падающего на поверхность коротковолнового солнечного излучения SW в апреле рассматриваемых годов – около  $240 \text{ Вт/м}^2$  (по данным [18]) при относительном стандартном отклонении около 13% ( $31 \text{ Вт/м}^2$ ). Величину RF\_A можно оценить как произведение SW на  $A$ .

Таблица 5

Средние потоки падающей на поверхность коротковолновой солнечной радиации (SW  $\pm$  их стандартные отклонения), а также радиационный форсинг альбедо (RF\_A) и его изменения ( $\Delta\text{RF}_A$ ) при изменении альбедо в пределах СКО (табл. 1) за все годы для каждого района,  $\text{Вт/м}^2$

Параметр	КП	НАО	ГП	НЛ
SW	$262 \pm 30$	$260 \pm 31$	$244 \pm 37$	$202 \pm 30$
RF_A	134	138	144	115
$\Delta\text{RF}_A$	$\pm 8$	$\pm 15$	$\pm 7$	$\pm 4$

В районе НАО при мало отличающихся от других рассматриваемых районов средних значениях падающей коротковолновой радиации и ее стандартного отклонения наблюдаются примерно в 2 раза более сильные вариации  $A$  (см. табл. 1), которые могут вызывать колебания  $\Delta\text{RF}_A$  более чем на 10%

(табл. 5). При этом ~8% изменчивости (см. табл. 4) обеспечивают тренды температуры воздуха в течение месяца, а ~4% – межсуточные колебания температуры.

## Связь альбедо поверхности и содержания ВС в атмосфере в разные годы

Как известно, межгодовые вариации в процессах циркуляции атмосферы, в погодных и климатических условиях очень велики [21]. Это усложняет поставленную задачу обнаружения закономерностей, свойственных семилетнему периоду в каждом районе. Однако можно обнаружить отдельные годы (в общем случае различные для разных районов), когда в апреле прослеживается достоверная связь альбедо поверхности и содержания ВС в атмосфере (рис. 2). Для 30 пар значений порог 5% вероятности достоверности коэффициента парной корреляции составляет 0,38 ( $R^2 = 0,14$ ) [20].

Как видно из рисунка, пространственные закономерности таковы: на европейском севере (КП и НАО)  $A$  и ВС значимо коррелировали в 2012 и 2013 гг., в центральной части арктического побережья России (НАО и ГП) – в 2013 и 2016 г., в районе НЛ – только в 2011 г. Анализ рассматриваемых метеопараметров не выявил в них какие-либо общие закономерности, характерные для всех 10 случаев, представленных на рис. 2, и отличающиеся их от остальных месяцев (из 28 рассмотренных).

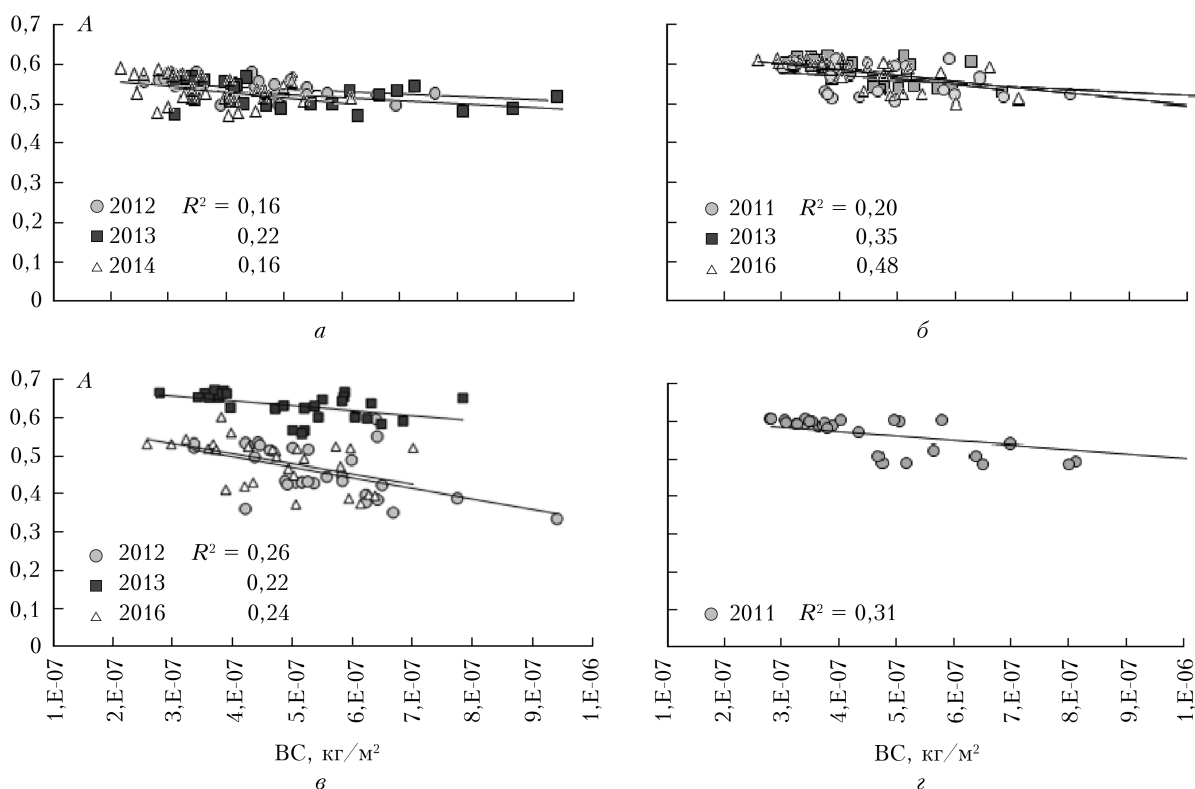


Рис. 2. Линейная аппроксимация зависимостей  $A$  от содержания ВС в атмосфере для КП (а), ГП (б), НАО (в) и НЛ (г) при достоверных коэффициентах корреляции

Также по рис. 2 можно заметить, что во всех районах есть годы со сравнительно слабым откликом на изменение содержания ВС, когда коэффициенты наклона прямых малы  $(0,6-0,8) \cdot 10^5 \text{ (кг/м}^2\text{)}^{-1}$ . Именно такие зависимости обнаружены в районах КП (2 года) и ГП (1 год). Наоборот, в районе НАО отмечено два случая с большими значениями коэффициента наклона — примерно  $(270-280) \cdot 10^5 \text{ (кг/м}^2\text{)}^{-1}$ . Остальные пять зависимостей соответствуют средним вариантам пропорциональности  $(120-180) \times 10^5 \text{ (кг/м}^2\text{)}^{-1}$ , встречающимся во всех исследуемых районах. Нам не удалось найти общие черты в наборе изучаемых параметров именно в эти годы. Несомненно, здесь проявляются все климатические, синоптические и метеорологические сходства и особенности разных районов и разных лет.

Дальнейшим продолжением работы может быть подробное изучение процессов циркуляции атмосферы, траекторий переноса воздушных масс и пространственного распределения источников ВС с целью обнаружения закономерностей и различий для разных районов и разных годов.

### Заключение

Проведен статистический анализ содержания черного углерода (ВС) в столбе атмосферы и альбедо подстилающей поверхности ( $A$ ), а также температуры приземного воздуха ( $T$ ) и количества осадков в апреле 2010–2016 гг. в четырех районах Российской Арктики.

Повышение температуры воздуха везде сопровождается понижением альбедо поверхности — как в трендах изменений этих величин в течение месяца, так и в вариациях с периодами меньше месяца. Осадки в виде свежего снега повышают альбедо поверхности, что закономерно в условиях весны, когда альбедо в среднем уже понижено по сравнению с зимним сезоном из-за старения снега.

С помощью метода многопараметрического анализа оценена возможная изменчивость альбедо (как правило, в пределах нескольких процентов) за счет вариаций исследуемых параметров — как из-за их линейных трендов в течение месяца, так и при вариациях за более короткие периоды.

Максимальные вариации  $A$  наблюдаются в районе НАО, где они могут изменить его вклад в радиационные процессы более чем на  $\pm 10\%$ , в то время как в других районах они модулируют его радиационный форсинг в пределах  $\pm (4-6)\%$ .

В целом за 7 лет достоверная отрицательная корреляция между ВС и  $A$  в апреле обнаружена только в районе ГП. В отдельные годы (в общем случае различные для разных районов) в пределах месяца также обнаружены синхронные межсуточные колебания  $A$  и ВС с отрицательными коэффициентами. Это может свидетельствовать о некоторой значимости процесса осаждения ВС из атмосферы для величины альбедо поверхности.

Отметим, что возможен и совершенно другой физический механизм образования отрицательной корреляции между ВС и  $A$ . Как отмечалось в [22],

ВС в атмосфере переносится в северные районы России чаще всего воздушными потоками с более южных территорий (именно там расположены наиболее мощные источники ВС). Но, ввиду климатической зональности, также с юга происходит и адвективный перенос тепла этими воздушными массами. А далее процесс понижения альбедо может развиваться по схеме повышения температуры (через изменение качества поверхности). Однако в этом случае должна быть положительная корреляция между ВС и  $T$ , что отмечено нами лишь в 10 месяцах из рассматриваемых 28. Из этих 10 только шесть совпадают с месяцами, представленными на рис. 2, когда есть достоверная связь ВС и  $A$ . Таким образом, статистика фиксирует наличие связи между величинами, не различая причин этих связей, для выяснения которых необходимы дополнительные исследования.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты № 18-05-60183, 18-05-60216).

1. AMAP Assessment 2015: Black carbon and ozone as Arctic climate forcers. Oslo, Norway, 2015. 116 p. ISBN 978-82-7971-092-9
2. 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., Storelomo T., Warren S.G., 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.
3. Stohl A., Klimont Z., Eckhardt S., Kupiainen K., Shevchenko V.P., Kopeikin V.M., Novigatsky A.N. Black carbon in the Arctic: The underestimated role of gas flaring and residential combustion emissions // Atmos. Chem. Phys. 2013. V. 13, N 17. P. 8833–8855.
4. Алексеев Г.В. Арктическое измерение глобального потепления // Лед и Снег. 2014. Т. 54, № 2. С. 53–68.
5. Макумас А.П., Уттал Т., Лаурилла Т., Парамонова Н.А. Гидрометеорологическая обсерватория Тикси (к пятилетию открытия) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 2 (104). С. 5–12.
6. Schneisser L., Backman J., Ogren J.A., Andrews E., Asmi E., Starkweather S., Uttal T., Fiebig M., Sharma S., Eleftheriadis K., Vratolis S., Bergin M., Tunved P., Jefferson A. Seasonality of aerosol optical properties in the Arctic // Atmos. Chem. Phys. 2018. V. 18, N 17. P. 11599–11622.
7. 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., Brocardo S., Piheth S.J. Aerosol remote sensing in polar region // Earth-Sci. Rev. 2015. V. 140. P. 108–115.
8. Popovicheva O., Diapouli E., Makshatas A., Shonija N., Manousakas M., Saraga D., Uttal T., Eleftheriadis K. East Siberian Arctic background and black carbon polluted aerosols at HMO Tiksi // Sci. Total Environ. 2019. V. 655. P. 924–938.

9. Lee W.-L., Liou K.N., He C., Liang H.-C., Wang T.-C., Li Q., Liu Z., 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.
10. Quinn P.K., Bates T.S., Baum E., Doubleday N., Fiore A.M., Flanner M., Fridlind A., Garrett T.J., Koch D. Short-lived pollutants in the Arctic: Their climate impact and possible mitigation strategies // *Atmos. Chem. Phys.* 2008. V. 8. P. 1723–1735.
11. Виноградова А.А., Васильева А.В. Модельные оценки концентрации черного углерода в приземном воздухе северных районов России // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 6. С. 467–475; Vinogradova A.A., Vasileva A.V. Black Carbon in air over northern regions of Russia: Sources and spatiotemporal variations // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 6. P. 533–541.
12. Виноградова В.В., Золотокрылин А.Н., Кренке А.Н. Районирование территории Российской Федерации по природно-климатическим условиям // *Изв. РАН. Сер. географическая.* 2008. № 5. С. 106–117.
13. *Access NASA Earth Science Data* [Electronic resource]. URL: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/> (last access: 27.10.2019).
14. *Global Modeling and Assimilation Office (GMAO)* (2015), MERRA-2 tavg1\_2d\_aer\_Nx: 2d,1-Hourly, Time-averaged, Single-Level, Assimilation, Aerosol Diagnostics V5.12.4, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) [Electronic resource]. URL: [https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/M2T1NXAER\\_5.12.4/summary](https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/M2T1NXAER_5.12.4/summary) (last access: 27.08.2019).
15. *MODIS BRDF/Albedo Product: Algorithm Theoretical Basis Document Version 5.0* [Electronic resource]. URL: [https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd\\_mod12.pdf](https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod12.pdf) (last access: 27.08.2019).
16. Виноградова А.А., Титкова Т.Б., Васильева А.В., Иванова Ю.А. Влияние летних природных пожаров в России на содержание черного углерода в атмосфере над арктическим побережьем Евразии // *Междунар. симпоз. «Атмосферная радиация и динамика»: тезисы.* СПб, 2019. С. 134–135. URL: <http://www.rrc.phys.spbu.ru/msard19/thesis.pdf> (дата обращения: 16.08.2019).
17. Harding R., Best M., Blyth E., Hagemann S., Kebab P., Tallaksen L.M., Warnaars T., Wiberg D., Wedon 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
18. *Water and Global Change* [Electronic resource]. URL: <http://www.eu-watch.org/> (last access: 27.08.2019).
19. Титкова Т.Б., Виноградова В.В. Сроки залегания снежного покрова на территории России в начале XXI века по спутниковым данным // *Лед и снег.* 2017. № 1. С. 25–33
20. Пановский Г.А., Брайер Г.В. Статистические методы в метеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 209 с.
21. *Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации.* М.: Росгидромет. 2014. 1009 с.
22. Виноградова А.А., Титкова Т.Б. Температура воздуха и концентрация черного углерода в приземной атмосфере в районе Тикси, Якутия // *Геофиз. процессы и биосфера.* 2019. Т. 18, № 4. С. 15–21.

**A.A. Vinogradova, T.B. Titkova. Atmospheric black carbon and surface albedo in the Russian Arctic in spring.**

We are studying the statistical relationships between the atmospheric column black carbon (BC) and the surface albedo ( $A$ ) based on MERRA-2 reanalysis data for four test areas near the Arctic coast of Russia in April 2010–2016. The analysis also includes atmospheric meteorological parameters from the WATCH website data: air temperature and amounts of liquid and solid precipitation. The statistical analysis has been carried out for daily average values. An increase in the air temperature is accompanied by a decrease in the surface albedo everywhere, both on a monthly scale and in daily variations. Snowfalls increase the surface albedo also everywhere. Reliable negative correlations between BC and  $A$  in April were found only on the Gydan Peninsula. Some years (different for different areas) with good correlations between day-to-day variations in  $A$  and BC values within a month, also with negative coefficients, were revealed. We estimated possible changes in albedo values, as well as in albedo radiative forcing due to variations in different parameters.