

ОПТИКА КЛАСТЕРОВ, АЭРОЗОЛЕЙ И ГИДРОЗОЛЕЙ

УДК 551.510.41

**Черный углерод в приземной атмосфере
вдали от источников эмиссий: сравнение результатов
измерений и реанализа MERRA-2**

Т.Б. Журавлева¹, А.В. Артюшина¹, А.А. Виноградова², Ю.В. Воронина^{1*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3

Поступила в редакцию 30.12.2019 г.

Приведены результаты сопоставления временной изменчивости среднемесячной концентрации черного углерода в приземном слое атмосферы, полученной по данным натурных измерений [BC] и реанализа MERRA-2 [BC]_M в четырех пунктах мониторинга, которые расположены в северной части России (обсерватория «Тикси», Печоро-Илычский биосферный заповедник), на Аляски (ст. Барроу) и в Гренландии (ст. Саммит). Показано, что данные реанализа MERRA-2 для районов Тикси и Барроу не в полной мере отражают вариации [BC] в течение года в отличие от Печоро-Илычского заповедника, где различия находятся в пределах 30–50%. Результаты реанализа [BC]_M для пункта мониторинга Саммит качественно согласуются с данными измерений, характеризующими содержание BC в свободной тропосфере, но занижены относительно [BC] более чем в 2 раза. В целом выполненный анализ показал, что для труднодоступных северных районов результаты реанализа MERRA-2 среднемесячных показателей приземной концентрации атмосферного черного углерода могут быть использованы для климатических оценок в теплое время года с ошибкой ~30%. Обсуждаются возможные причины расхождений [BC] и [BC]_M в зависимости от времени года и района наблюдений.

Ключевые слова: черный углерод, приземный слой, Арктика, наземные измерения, реанализ MERRA-2; black carbon, atmospheric surface layer, Arctic; ground-based measurements, MERRA-2 reanalysis.

Введение

Для лучшего понимания роли аэрозоля в формировании радиационного баланса планеты, оценки его антропогенного воздействия и влияния на качество воздуха в течение последних 30 лет предпринимаются большие усилия как для развития систем наблюдений, так и для совершенствования аэрозольных моделей и соответствующих блоков в климатических и химико-транспортных моделях.

Информацию о характеристиках аэрозоля дают результаты наземного и космического дистанционного зондирования, а также данные *in situ* измерений, выполняемых на поверхности Земли и с борта самолета. Однако, несмотря на длительный период наблюдений, совершенствование и расширение аппаратурно-методической базы экспериментальных исследований и развитие алгоритмов восстановления, до сих пор остаются существенные пробелы в описании микрофизических и оптических свойств

аэрозолей (форма и размеры частиц, поглощение и т.д.) и их пространственно-временного распределения в разных регионах земного шара. Что касается аэрозольных моделей, то их усложнение пока не в полной мере устраняет неопределенности модельных расчетов, что связано с качеством используемых параметризаций физических процессов и трудностями описания эмиссий.

Один из подходов для улучшения качества описания аэрозоля в атмосфере заключается в объединении результатов моделирования и данных натурных измерений с использованием приемов усвоения (ассимиляции) данных. В последние годы этот подход интенсивно развивается в крупных мировых центрах прогноза погоды и исследования климата [1–3]. Кроме того, положительные последствия ассимиляции спутниковых и наземных наблюдений аэрозольных характеристик отмечаются при моделировании прогноза качества воздуха в региональном масштабе [4, 5]. Одной из распространенных версий реанализа является MERRA-2 (The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2), разработанная в NASA GMAO (Global Modelling and Assimilation Office) для периода современной космической эры (с 1980-х гг. [6]).

* Татьяна Борисовна Журавлева (ztb@iao.ru); Анастасия Валерьевна Артюшина (vav@iao.ru); Анна Александровна Виноградова (avinograd@yandex.ru); Юлия Владимировна Воронина (yulia@iao.ru).

Черный углерод (BC – black carbon) – это климатически значимая составляющая атмосферы, которая в последние десятилетия является объектом пристального внимания научного сообщества – как экспериментаторов, так и специалистов по численному моделированию. Однако в удаленных и труднодоступных регионах непосредственные измерения в большинстве случаев проводятся эпизодически и с помощью разных методик, что затрудняет использование результатов для различных обобщений.

Цель настоящей работы состоит в сопоставлении среднемесячных значений приземной концентрации черного углерода, полученных по данным реанализа MERRA-2 ($[BC]_M$) и измеренных *in situ* ($[BC]$) в некоторых районах севера России и зарубежной Арктики, недостаточно обеспеченных станциями регулярного мониторинга состава и состояния окружающей среды из-за значительной площади, малой доступности большинства территорий и суровых климатических условий.

1. Моделирование аэрозоля в MERRA-2

В основе MERRA-2 лежит модель GEOS-5 (Goddard Earth Observing System, version 5), содержащая блоки моделирования циркуляции атмосферы и океана, состава атмосферы, биогеохимии, процессов на поверхности Земли и т.д. Модель имеет 72 атмосферных σ -уровня вплоть до 0,01 гПа (~85 км); пространственное разрешение составляет $0,5^\circ \times 0,625^\circ$ (широта \times долгота). Один из компонентов GEOS-5 – система ассимиляции данных, обеспечивающая совместное усвоение результатов наблюдений метеорологических полей и аэрозольной оптической толщины (AOT), полученной на основе результатов спутниковых измерений спектрорадиометрами MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, Terra и Aqua), AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), MISR (Multiangle Imaging Spectro Radiometer), а также наземных измерений прямого излучения фотометрами CE-318 сети AERONET. Подчеркнем, что AOT является единственной аэрозольной характеристикой, задействованной в процедуре усвоения данных. Поэтому корректировка заложенных в GEOS-5 модельных характеристик возможна только для тех временных интервалов и регионов земного шара, которые обеспечены соответствующими данными наблюдений.

Детальное описание аэрозольного модуля, блоков моделирования эмиссий различных типов аэрозоля и системы усвоения аэрозольных данных приведено в [7–9]. В основе аэрозольного модуля лежит модель GOCART (Goddard Chemistry, Aerosol, Radiation, and Transport model [10, 11]), в которой учитывается 15 аэрозольных компонент в предположении внешней смеси: пыль и морская соль (по пять непересекающихся по размерам фракций), гидрофобный и гидрофильный углерод (черный и органический) и сульфаты. Оптические характеристики этих компонент определяются базой данных OPAC (Optical Properties of Aerosols and Clouds [12]).

Ассимиляция AOT происходит в два этапа. На первом шаге восстанавливается двумерное распределение AOT, а результатом реализации второго шага являются данные о вертикальной структуре поля относительного содержания каждой из аэрозольных компонент в пределах ячейки сетки. Полученное 3D-распределение массовой концентрации аэрозольных компонент в совокупности с данными об их спектральной изменчивости в рамках модели GOCART обеспечивает вычисление большого набора физических и оптических аэрозольных характеристик.

Верификация продуктов реанализа выполняется на основе данных независимых спутниковых, наземных и самолетных наблюдений, которые не используются в системе ассимиляции MERRA-2. Результаты выполненной для ряда регионов валидации вертикальных профилей коэффициентов обратного рассеяния, приземных значений массовой концентрации аэрозольных частиц $PM_{2,5}$, аэрозольного индекса и оптической толщины поглощения ($\lambda = 388$ нм), а также анализ некоторых экстремальных событий (например, извержение вулкана Пинатубо) и т.д. приведены в [7, 9]. Сопоставление вертикальных распределений черного углерода в различных регионах земного шара по данным MERRA-2 и *in situ* измерений, полученных в ходе комплексных экспериментов HIPPO (High-performance Instrumented Airborne Platform for Environmental Research Pole-to-Pole Observations of Carbon Cycle and Greenhouse Gases Study, 2009–2011 гг.) и ARCTAS (Arctic Research of the Composition of the Troposphere from Aircraft and Satellites, 2008 г.), представлено в [13, 14].

Полное множество данных реанализа находится в открытом доступе на сайте GES DISC (Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center; <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/mdisc/>); коллекции отдельных аэрозольных характеристик представлены также на сайте <https://giovanni.gsfc.nasa.gov>.

2. Наземные наблюдения

В работе использованы измеренные значения приземной массовой концентрации черного углерода для четырех пунктов наблюдения: двух российских (гидрометеорологическая обсерватория (ГМО) «Тикси» на побережье моря Лаптевых и пос. Якша на территории Печоро-Илычского государственного природного биосферного заповедника, ПИГПБЗ) и двух зарубежных (ст. Барроу (Barrow), Аляска, и ст. Саммит (Summit), о-в Гренландия). Краткая информация о выбранных пунктах наблюдения приведена в таблице.

Для трех пунктов (кроме ПИГПБЗ) значения концентрации BC были восстановлены на основе данных измерений аэрозольного поглощения с использованием эталометров (<ftp://ftp1.esrl.noaa.gov/psd3/arctic/>). Исходные массивы данных содержали отрицательные значения $[BC]$, которые, по всей видимости, были результатом неадекватного отклика приборов на минимальные концентрации BC,

Характеристика пунктов наблюдения

Пункт наблюдения	Координаты	Полярный день/ночь	Период измерений ВС, использованных в настоящей работе	Доля отрицательных значений [BC] в мае – сентябре/октябре – апреле, %
Пос. Якша, Печоро-Илычский государственный природный биосферный заповедник/PIR	61,82° с.ш., 56,84° в.д.	Нет	12.2017–12.2018 гг.	Нет
ГМО «Тикси»/TKS	71,59° с.ш., 128,92° в.д.	10.05–3.08/ 19.11–24.01	1.2010–12.2018 гг.	35/10
Барроу (Barrow)/BRW	71,32° с.ш., 156,61° з.д.	12.05–2.08/ 18.11–23.01	3.2010–3.2013 гг.	45/5
Саммит (Summit)/SUM	72,58° с.ш., 38,48° з.д.	6.05–5.08/ 15.11–27.01	8.2003–4.2013 гг.	40/50

находящиеся на пределе их чувствительности. Доля отрицательных значений достигала 35–45% в светлое время года (май – сентябрь). В остальное время (октябрь – апрель) часть отрицательных значений уменьшилась до 5–10% в «Тикси» (TKS) и на ст. Барроу (BRW), а часть увеличилась до 50% на Саммите (SUM) (см. таблицу). После перехода к среднесуточным значениям, вычисленным после удаления из исходного множества отрицательных значений, были рассчитаны среднемесячные приземные концентрации ВС. В дальнейшем эти данные использовались при сравнениях с результатами реанализа; другие статистические характеристики [BC] на этом этапе не рассматривались.

В «Тикси» и на ст. Барроу, помимо измерения [BC], выполнялись измерения спектральных коэффициентов рассеяния и поглощения аэрозольными частицами [15] с помощью фотометров CE-318, входящих в наземную сеть AERONET и обеспечивающих информацию о микроразличиях и оптических характеристиках аэрозоля в столбе атмосферы (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>).

Для получения данных о [BC] на территории ПИГБЗ (PIR) производился отбор проб с использованием перхлорвиниловых фильтров АФА-ХП-20 (1 раз в сутки) с последующей обработкой фотометром ИФА РАН [16]. Хотя период измерений (сентябрь 2017 – декабрь 2018 г.) был существенно меньше, чем для остальных трех пунктов, сведения о [BC] включены в приведенный ниже анализ, учитывая дефицит экспериментальных данных для труднодоступных районов севера России. Исследования аэрозоля в российском секторе в последние 10–15 лет стали более интенсивными, и в настоящее время измерения аэрозольных характеристик и [BC] проводятся в пос. Баренцбург (арх. Шпицберген), стационаре «Ледовая база «Мыс Баранова»», а также в ходе ежегодных морских и самолетных экспедиций (см., например, [17–22] и приведенную там библиографию). Однако данные этих станций относятся к отдельным непродолжительным периодам наблюдений, которых пока, на наш взгляд, недостаточно для обобщения результатов.

3. Результаты сопоставления данных измерений и реанализа

Прежде чем переходить к обсуждению результатов сопоставления, сравним данные о пространственных распределениях АОТ, полученные на основе измерений спутниковым сканером MODIS и с помощью реанализа.

На рис. 1 (цв. вкладка) приведены усредненные за 2000–2018 гг. поля АОТ ($\lambda = 550$ нм) и их различия для двух центральных месяцев холодного и теплого сезонов – января и июля – в зоне 60–80° с.ш.

Во-первых, результаты восстановления АОТ на основе спутникового зондирования (в отличие от MERRA-2) не покрывают всей рассматриваемой широтной зоны даже в июле: сведения об АОТ отсутствуют, в частности, над о-м Гренландия, где расположен пункт наблюдения SUM. Отметим также, что на всех рассмотренных сайтах средние значения АОТ, полученные с использованием процедур реанализа, завышены относительно результатов дистанционного зондирования на ~0,1. Во-вторых, в январе АОТ восстанавливается лишь в отдельных участках кольца 60–65° с.ш., а все рассматриваемые нами пункты наблюдения находятся вне этой зоны. Для других месяцев года ситуация аналогична: в светлый период года усвоение спутниковых данных об АОТ возможно для всех пунктов мониторинга, кроме SUM, а в остальное время возможность использования результатов дистанционного зондирования определяется ограничениями алгоритмов восстановления АОТ в арктическом и субарктических регионах.

Отсутствие информации об АОТ означает, что при расчетах приземной концентрации ВС, как и других аэрозольных характеристик, используются только данные об аэрозоле, представленные в модели GOCART, и результаты ассимиляции метеонаблюдений. Поэтому следует ожидать, что более достоверные результаты будут получены для светлого времени года.

3.1. Временная изменчивость приземной концентрации ВС по данным многолетних наблюдений

По данным многолетних наблюдений, на большинстве арктических станций (Цепелин (Zeppelin Mountain), о-в Шпицберген; Алерт (Alert), Канада; Барроу, ГМО «Тикси» и др.) пик загрязнения черным углеродом приходится на период зимы и ранней весны [23, 24]. Это явление, известное в литературе как «арктическая дымка», обусловлено интенсивными газовой-аэрозольными выносами из средних широт Северного полушария и сильными температурными инверсиями [25, 26]. Поздней весной и в летние месяцы вклад дальнего переноса от антропогенных источников (транспорт, промышленность, сжигание природного газа и т.д.) падает, и на фоне более низкого уровня загрязнений в целом проявляется доминирующее влияние дымов от близких и удаленных лесных пожаров [27–29]. Следует принимать во внимание также воздействие на величину приземной концентрации ВС ближайших локальных источников [19, 30].

3.1.1. ГМО «Тикси»

Анализ метеорологических условий на TKS, описанный в [31] (2010–2013 гг.) и [19] (отдельные периоды наблюдений 2014–2016 гг.), показал, что давление, температура, направление и скорость ветра, а также происхождение воздушных масс по пяти суточным траекториям имеют в целом схожие сезонные циклы.

С ноября по март на побережье моря Лаптевых преобладают воздушные массы, сформированные над континентом (> 50% дней). Низкая температура воздуха и слабый ветер способствуют накоплению черного углерода вблизи поверхности земли, вследствие чего в холодное время года наблюдаются стабильно высокие среднемесячные значения [BC], превышающие 150 нг/м^3 (рис. 2, а). С апреля приземная концентрация ВС уменьшается, достигая минимума в августе–сентябре. В конце весны – начале лета увеличивается доля воздушных масс с акватории Северного Ледовитого и Тихого океанов и, как правило, начинается сезон лесных пожаров. Характерное для этого периода чередование кратковременных (продолжительностью в несколько дней) интервалов с высокой и низкой концентрацией ВС отмечается в [19, 32]. Увеличение [BC] в осенний период связано с постепенным формированием условий дальнего переноса ВС в атмосфере, характерных для холодного полугодия, в частности с территорий газодобывающих регионов (Ханты-Мансийский и Ямало-Ненецкий автономные округа, ХМАО и ЯНАО) и Норильска [33], а также с увеличением антропогенных эмиссий ВС при повышении интенсивности отопления жилых и промышленных помещений.

Из приведенных на рис. 2 результатов следует, что данные реанализа [BC]_M не отражают сезонного хода приземной концентрации черного углерода,

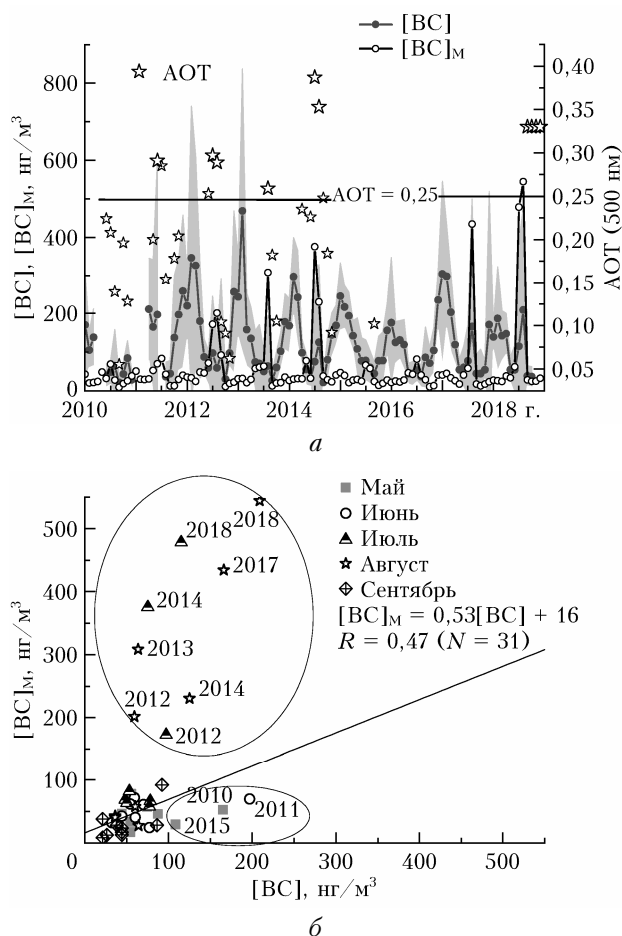


Рис. 2. Наблюдения и реанализ – среднемесячные [BC] и [BC]_M для района TKS: а – временные вариации концентрации ВС (точки), \pm СКО измерений (серая штриховка), а также значения AOT(500 нм) по данным AERONET (звездочки); б – соотношение данных реанализа и наземных наблюдений в период с мая по сентябрь. Здесь и на рис. 3, б–5, б приведены также уравнения линейной регрессии между [BC] и [BC]_M и коэффициент корреляции, рассчитанные с использованием N точек

выявленного в ходе натурных экспериментов. Основное отличие состоит в существенном занижении [BC]_M в октябре–апреле, когда отношение среднемесячных значений $[BC]/[BC]_M$ варьируется примерно от 3 до 15. В светлый период года [BC]_M и [BC] сближаются. Если удалить из рассмотрения точки, соответствующие выделенным на рис. 2, б множествам значений, то значение коэффициента корреляции $R \approx 0,47$ (с достоверностью 99% согласно критерию Стьюдента).

Анализ выделенных на рис. 2, б пар значений ([BC], [BC]_M) показал, что данные реанализа превышают результаты наземных наблюдений примерно в 2 (июль 2012 г.) – 4 раза (август 2018 г.). Почти все ситуации соответствуют сравнительно высокому среднемесячному значению AOT по данным AERONET-наблюдений ($AOT(500 \text{ нм}) > 0,25$), причиной которых являются сильные пожары на территории Восточной Сибири [34]. В то же время в мае 2010 и 2015 гг. и июне 2011 г. [BC]_M была

занижена по отношению к [BC] в 3–4 раза. Причины этих расхождений требуют более детального анализа и в настоящей работе не рассматриваются.

3.1.2. ПИГПБЗ

Измерения на территории Печоро-Ильчского природного заповедника были начаты в сентябре 2017 г. в пос. Якша (население ~1000 чел.), который примыкает к северной части Уральских гор и располагается вдали от больших городов и промышленных центров [16, 30]. После двухмесячного функционирования в пос. Якша пробоотборник был перенесен на ~1,8 км восточнее первоначального положения в ближайший лесной массив. В настоящем исследовании мы используем данные измерений именно в лесном массиве (декабрь 2017 – декабрь 2018 г.).

Выполненный в [16, 30] анализ средних распределений направлений поступления воздушных масс к пункту наблюдений показал, что с октября по март вклад воздуха из западного и южного секторов составил ~70%. В апреле–сентябре их количество уменьшилось до ~55% на фоне увеличивающейся доли направлений из северного сектора. Зона влияния источников эмиссии BC охватывала территорию в пределах 52–72° с.ш., 46–66° в.д., на которой расположены антропогенные источники черного углерода (промышленные районы Свердловской обл. и Пермского края, северо-западные районы ХМАО и ЯНАО с их нефте- и газодобывающим производством, города и поселки Республики Коми) и локализованы пожары.

Изменчивость среднемесячных значений [BC] в течение года аналогична наблюдаемой в ГМО «Тикси» (рис. 2, а и 3, а): высокие концентрации черного углерода в осенне-зимний период и более низкие – поздней весной и летом (с минимумом в мае – июне). Однако, в отличие от TKS, [BC] удовлетворительно согласуется с данными реанализа в течение всего периода наблюдений (рис. 3, б): $R \approx 0,76$ (с достоверностью 99% согласно критерию Стьюдента). Тем не менее делать вывод о том, что результаты реанализа успешно прошли верификацию в этом пункте наблюдений, пока преждевременно ввиду относительно короткого периода наземных наблюдений (1 год). Для получения более достоверных данных желательно продолжить мониторинг [BC] на территории ПИГПБЗ.

3.1.3. Станция Барроу

Измерения приземной концентрации черного углерода на ст. Барроу проводились с использованием азталометров и PSAP (Particle Soot Absorption Photometer) с 1988 г. Полученный на BRW ряд наблюдений является одним из самых длинных и отражает вариации [BC] в различные периоды многолетнего мониторинга, обусловленные изменением как траекторий воздушных масс, так и локаций, типов и интенсивности источников загрязнений

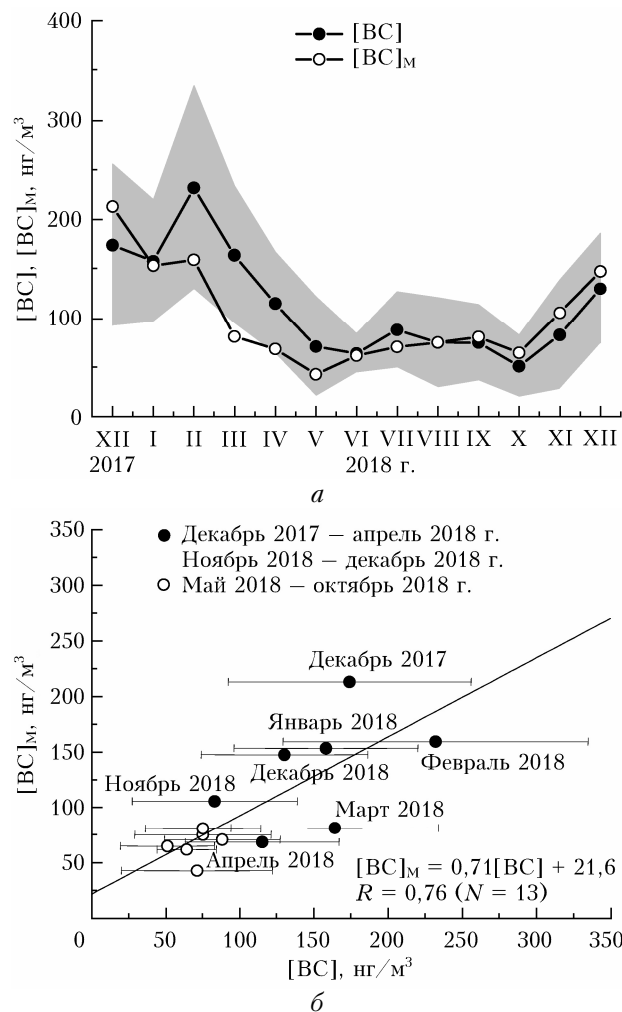


Рис. 3. Наблюдения и реанализ – среднемесячные [BC] и [BC]_М для района PIR: а – временные вариации концентрации BC (точки), ±СКО измерений (серая штриховка); б – соотношение данных реанализа и наземных наблюдений в течение периода измерений (горизонтальные отрезки – ±СКО измерений)

в течение 30 лет (см., например, [24, 35]). В частности, в [24] описано, как изменился перенос воздушных масс за первые 20 лет наблюдений: если зимой 1990–1994 гг. BRW находился под влиянием атмосферного переноса из Казахстана, восточной России и Восточно-Сибирского моря, то в 2004–2008 гг. доминирующими стали воздушные массы с территорий северо-западной Евразии, Гренландии и арктической зоны Канады. В летнее время влияние удаленных районов Северного Ледовитого океана, Северной Атлантики и их побережий сменилось на локальное воздействие воздушных масс с моря Бофорта.

В работе рассматриваются находящиеся в открытом доступе данные измерений [BC], полученные за период 2010–2013 гг. (рис. 4, а). Сезонные вариации приземной концентрации черного углерода характеризуются максимальными (> 70 нг/м³) значениями зимой и ранней весной, которые, однако, меньше по сравнению с TKS и PIR. В летний

период значения $[BC]$ уменьшаются, но на общем фоне снижения в рассматриваемый период фиксируется всплеск содержания черного углерода в августе (см. также [35]). Согласно данным моделирования с использованием химической транспортной модели GEOS-Chem, основные источники загрязнений в зимний период находятся на территории северной (50%), ранней весной – юго-восточной Азии (40%), а летний пик $[BC]$ на ст. Барроу авторы [35] связывают с пожарами в Северной Америке.

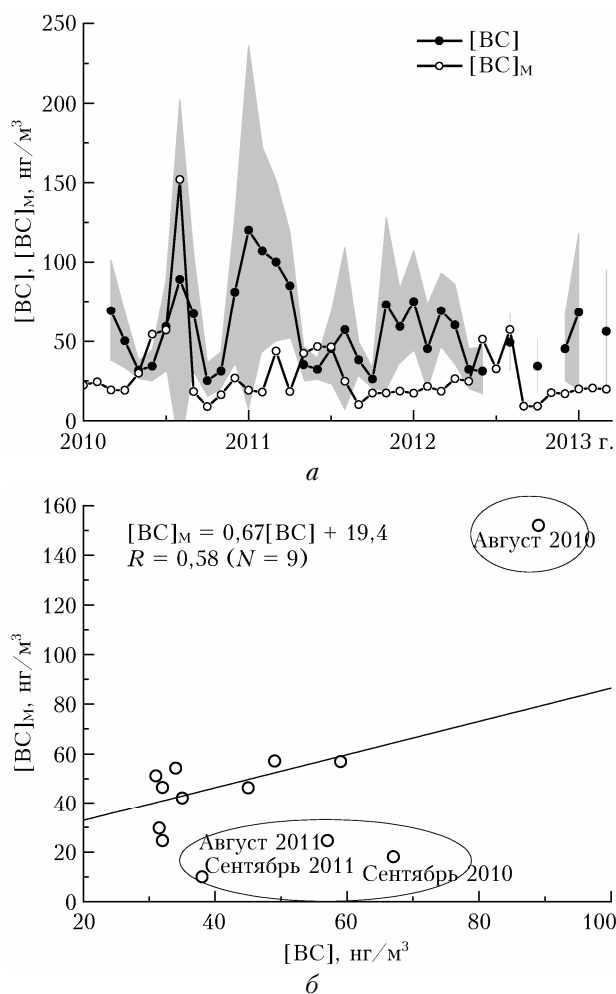


Рис. 4. Наблюдения и реанализ – среднемесячные $[BC]$ и $[BC]_M$ для района BRW: *a* – временные вариации концентрации BC (точки), \pm СКО измерений (серая штриховка); *б* – соотношение данных реанализа и наземных наблюдений с мая по сентябрь

Временная изменчивость данных реанализа $[BC]_M$ отличается от натуральных измерений $[BC]$, прежде всего, за счет существенно меньших значений $[BC]_M$ в зимний период. Анализ результатов для светлого времени года (рис. 4, б) показывает, что в августе–сентябре 2010–2011 гг. $[BC]$ превышает $[BC]_M$ примерно в 2–3 раза. На сегодняшний день мы не располагаем достаточным объемом сведений, который бы позволил адекватно интерпре-

тировать эти ситуации. Одной из возможных причин таких расхождений может быть высокий балл облачности в районе ст. Барроу и, как следствие, ограниченное количество информации о восстановленной по данным спутникового зондирования величине АОТ. Не исключено также, что в эти периоды BRW находилась в зоне дымовых шлейфов (скорее всего, с территории Северной Америки). Для остальных данных наблюдений $R \approx 0,58$ (с достоверностью 90% по критерию Стьюдента). Отметим, что уравнение линейной регрессии и коэффициент корреляции получены на основе небольшого объема данных (количество точек $N = 9$, рис. 4), поэтому приведенные количественные оценки следует рассматривать как предварительные.

3.1.4. Станция Саммит

Круглогодичная исследовательская ст. Саммит, расположенная в центре ледникового щита Гренландии на высоте более 3238 м н. ур. м., находится на большом расстоянии от антропогенных источников, кроме близлежащего лагеря научных сотрудников, максимальная число которых в летнее время не превышает 60 чел.

SUM – единственный из рассмотренных выше пунктов мониторинга аэрозоля в свободной тропосфере. Согласно результатам анализа приземных характеристик аэрозоля на шести арктических станциях в 2010–2013 гг., здесь наблюдалось наименьшее значение коэффициента рассеяния и наибольшее значение параметра Ангстрема рассеивающей компоненты атмосферы [15]. Это свидетельствует о преобладании в составе аэрозоля мелких аэрозольных частиц и соответствует представлениям о формировании распределения числа частиц по размерам в ходе дальнего переноса: крупные частицы оседают раньше, чем достигают пункта мониторинга. Так же работает и второй фактор, определяющий доминирование мелкодисперсной фракции аэрозоля: удаленность SUM от акватории океана обуславливает уменьшение роли морского источника грубодисперсных аэрозолей в Арктике.

Приведенные на рис. 5, *a* данные за 2003–2013 гг. показывают, что в зимнее время величина $[BC]$ в основном не превышает 40–70 $\text{нг}/\text{м}^3$ (см. также [36]). Увеличение приземной концентрации сажи наблюдается в летний период и, скорее всего, связано с появлением над точкой наблюдения дымовых шлейфов, принесенных с территории Канады, Аляски и Сибири, и продуктов горения сельскохозяйственных культур в Восточной Европе [37–39]. Отметим, что пожары могут иметь место и в Гренландии, но их вклад в $[BC]$ на ст. Саммит существенно слабее [38]. Экспериментально определенные значения концентрации черного углерода возрастают летом до 100 $\text{нг}/\text{м}^3$, достигая в отдельные годы среднемесячных значений 150–180 $\text{нг}/\text{м}^3$ (2008–2009 гг.).

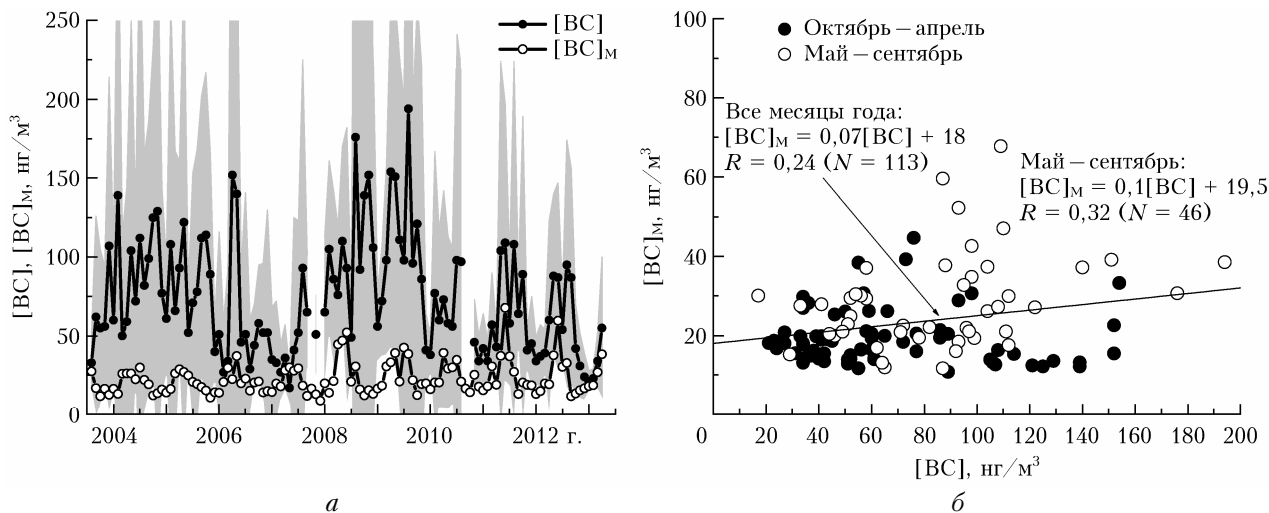


Рис. 5. Наблюдения и реанализ – среднемесячные $[BC]$ и $[BC]_M$ для района SUM: *a* – временные вариации концентрации BC (точки), \pm СКО измерений (серая штриховка); *б* – соотношение данных реанализа и наземных наблюдений с мая по сентябрь и в течение года в целом

Результаты реанализа существенно ниже и, независимо от сезона, редко превышают 60 нг/м^3 . Корреляция $[BC]$ и $[BC]_M$ сравнительно невелика: $R \approx 0,32$ (достоверность 96% по критерию Стьюдента) в светлый период и $0,24$ (достоверность 98% по критерию Стьюдента) в течение года в целом.

3.2. Внутригодовая изменчивость $[BC]$ по данным реанализа и натурных измерений

Рассмотрим внутригодовую изменчивость $[BC]$ и $[BC]_M$ в 2010–2013 гг. (рис. 6, *a, в, г*). Этот период

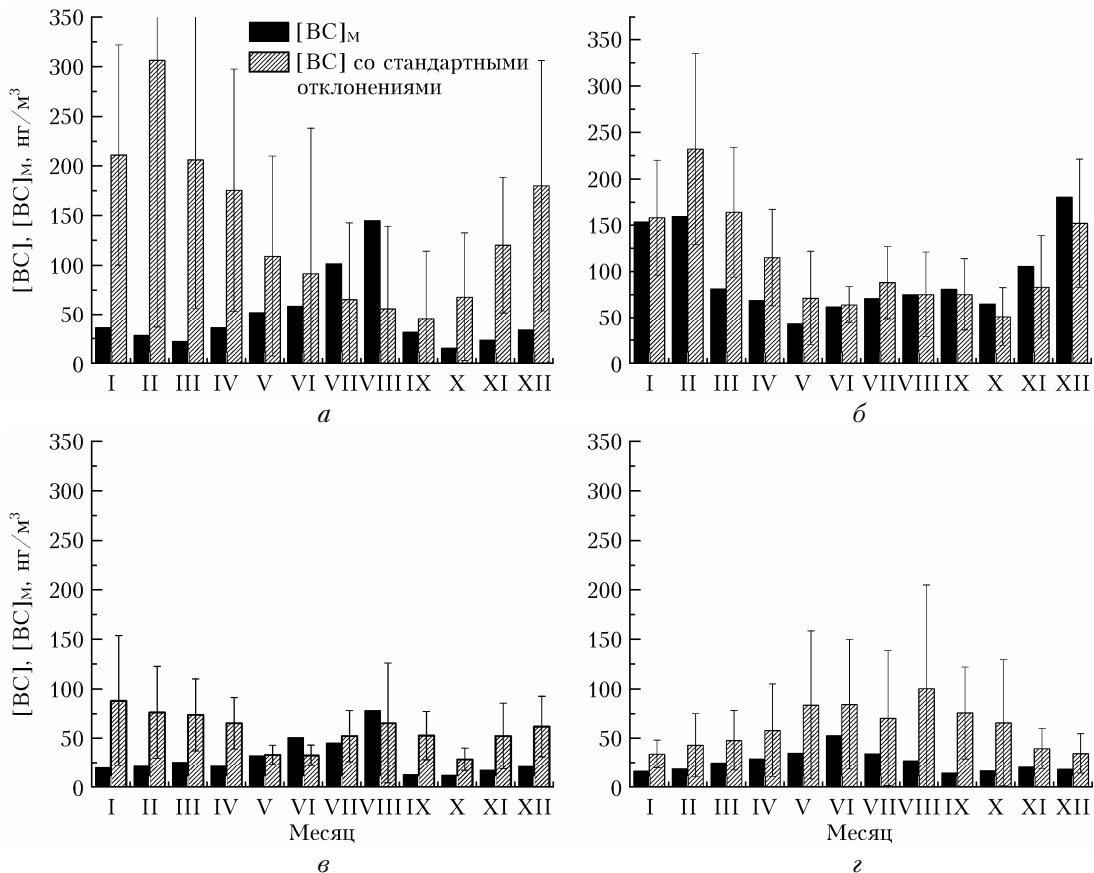


Рис. 6. Внутригодовая изменчивость $[BC]$ и $[BC]_M$ по данным многолетних измерений на TKS (*a*), BRW (*в*), SUM (*г*) в 2010–2013 гг. и в PIR (*б*) в 2017–2018 гг.

выбран потому, что является общим для пунктов мониторинга TKS, BRW и SUM. Также на рис. 6, б приведены данные, характеризующие [BC] и [BC]_M в Печоро-Ильчском заповеднике в 2017–2018 гг.

Данные измерений [BC] в ГМО «Тикси» и на ст. Барроу отражают характерное для этого региона наличие «арктической дымки» с максимальными значениями в период поздней осени – начала весны. На территории Печоро-Ильчского заповедника возрастание приземной концентрации BC в холодное время связано с повышением антропогенных эмиссий за счет усиления вклада отопительных процессов. Наиболее высокий средний уровень загрязнения ($> 150 \text{ нг/м}^3$) наблюдается на территории российского побережья (TKS и PIR), тогда как на BRW максимум [BC] не превышает 80 нг/м^3 . Годовой ход концентрации черного углерода во внутренней части о-ва Гренландия (SUM) принципиально иной. Наибольшие значения [BC] фиксируются в мае–сентябре, когда на северных территориях материков Евразии и Америки из года в год происходят пожары.

Сопоставление [BC] и [BC]_M для TKS и BRW показывает, что данные реанализа в целом не отражают внутригодовой изменчивости концентрации сажи в приземном воздухе (рис. 6, а, в). Величина [BC]_M максимальна в летний период, тогда как в остальное время ее средние значения существенно ниже [BC]. В частности, в ноябре–феврале данные реанализа в ГМО «Тикси» более чем в 5 раз ниже результатов измерений. Возможно, это частично связано с влиянием ближайших населенных пунктов, которые интенсивно отапливаются зимой. Для летнего периода 2010–2013 гг. наблюдается существенное сближение [BC] и [BC]_M вплоть до некоторого превышения данных реанализа относительно измерений.

Приведенные на рис. 6, б, г данные реанализа для пунктов PIR и SUM удовлетворительно описывают внутригодовую изменчивость приземной концентрации: в PIR летом прослеживаются минимальные значения [BC]_M, возрастающие в осенне-весенний период, а в свободной тропосфере на ст. Саммит наименьшие [BC] и [BC]_M наблюдаются с ноября по март, увеличиваясь в летние месяцы. Удовлетворительное количественное согласие между [BC] и [BC]_M имело место в 2017–2018 гг. в PIR, где различия в основном не превышали 30%, достигая максимума (~50%) в марте и октябре. Что касается SUM, то натурные измерения превышают данные реанализа примерно в 2 раза, а в августе–октябре значение [BC]_M по сравнению с измерениями занижено в ~4 раза.

Заключение

Приведено сопоставление временной изменчивости среднемесячной концентрации черного углерода в приземном слое атмосферы, полученной по данным натурных измерений [BC] и реанализа MERRA-2 [BC]_M в четырех пунктах мониторинга,

расположенных на территории северной части России, Аляски и Гренландии.

На основе сравнительного анализа сделаны следующие выводы.

1. Согласно данным многолетних наблюдений максимальные значения среднемесячной концентрации BC в приземном воздухе в арктических районах наблюдаются зимой, значительно уменьшаясь в период с мая по сентябрь. ГМО «Тикси» – $300 \pm 270 \text{ нг/м}^3$ (февраль) и $45 \pm 70 \text{ нг/м}^3$ (сентябрь); Печоро-Ильчский заповедник – $230 \pm 100 \text{ нг/м}^3$ (февраль) и $65 \pm 20 \text{ нг/м}^3$ (июнь); ст. Барроу (Аляска) – $90 \pm 65 \text{ нг/м}^3$ (январь) и $32 \pm 10 \text{ нг/м}^3$ (май–июнь). На ст. Саммит (о-в Гренландия), где измерения соответствуют уровню свободной тропосферы, наблюдается обратная ситуация: минимальные значения концентрации BC ($34 \pm 20 \text{ нг/м}^3$) зафиксированы в декабре–январе, тогда как в летний период среднемесячные значения достигают максимума ($100 \pm 100 \text{ нг/м}^3$).

2. Для районов ГМО «Тикси» и ст. Барроу данные реанализа MERRA-2 [BC]_M не в полной мере отражают качественный характер сезонных вариаций концентрации BC в приземном воздухе. В частности, на «Тикси» значения в январе–феврале занижены относительно измеренных примерно на порядок. Одной из возможных причин таких расхождений может быть отсутствие достоверной спутниковой информации относительно АОТ в период с поздней осени до начала весны (включая период полярной ночи) и, как следствие, использование в процедурах реанализа исключительно модельных данных об атмосферном аэрозоле. Вместе с тем в летний период данные измерений и реанализа сближаются, причем результаты реанализа могут даже превышать измеренные среднемесячные значения до 2 раз.

3. Оценки реанализа MERRA-2 среднемесячной приземной концентрации BC в воздухе Печоро-Ильчского заповедника, расположенного на 10° южнее всех остальных станций, соответствуют данным наземных измерений в пределах ~30%. Однако ввиду относительно короткого периода мониторинга в этом пункте (один год) сделать обоснованные выводы о качестве данных реанализа пока не представляется возможным.

4. На полярной ст. Саммит (высота более 3 км н. у. м.) данные реанализа о концентрации BC в приземном воздухе качественно согласуются с результатами измерений, но количественно отличаются не менее чем в 2 раза. Однако следует иметь в виду, что спутниковые данные об АОТ над о-вом Гренландия отсутствуют практически в течение всего года, а в процедурах реанализа для этой станции используются модельные характеристики аэрозоля для свободной тропосферы.

Выполненный анализ показал, что для труднодоступных северных районов результаты реанализа MERRA-2 среднемесячных показателей приземной концентрации атмосферного черного углерода могут быть использованы для климатических оценок в теплое время года с ошибкой в ~30%.

Авторы благодарны организаторам сайтов <http://giovanni.gsfc.nasa.gov>, <http://aeronet.gsfc.nasa.gov> и <ftp://ftp1.esrl.noaa.gov/psd3/arctic/> за формирование информации и возможность ее свободного использования. Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 17-05-00245; подготовка экспериментальных данных, в том числе измерения на территории Печоро-Илычского заповедника) и в рамках государственного задания (проект № АААА-А17-117021310142-5; анализ и сопоставление результатов измерений и реанализа).

- Zhang J., Reid J.S., Westphal D.L., Baker N.L., Hyer E.J. A system for operational aerosol optical depth data assimilation over global oceans // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. DOI: 10.1029/2007JD009065.
- Benedetti A., Morsette J.-J., Boucher O., Dethof A., Engelen R.J., Fisher M., Flentje H., Huneeus N., Jones L., Kaiser J.W., Kinne S., Mangold A., Razinger M., Simmons A.J., Suttie M. Aerosol analysis and forecast in the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Integrated Forecast System: 2. Data assimilation // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. DOI: 10.1029/2008JD011115.
- Lynch P., Reid J.S., Westphal D.L., Zhang J., Hogan T.F., Edward J.H., Curtis C.A., Hegg D.A., Shi Y., Campbell J.R., Rubin J.I., Sessions W.R., Turk F.J., Walker A.L. An 11-year global gridded aerosol optical thickness reanalysis (v1.0) for atmospheric and climate sciences // *Geosci. Model Dev.* 2016. V. 9, N 4. P. 1489–1522. DOI: 10.5194/gmd-9-1489-2016.
- Li Z., Zang Z., Li Q.B., Chao Y., Chen D., Ye Z., Liu Y., Liou K.N. A three-dimensional variational data assimilation system for multiple aerosol species with WRF-Chem and an application to PM_{2.5} prediction // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13, N 8. P. 4265–4278. DOI: 10.5194/acp-13-4265-2013.
- Saïde P.E., Kim J., Song C.H., Choi M., Cheng Y., Carmichael G.R. Assimilation of next generation geostationary aerosol optical depth retrievals to improve air quality simulations // *Geophys. Res. Lett.* 2014. V. 41, N 24. P. 9188–9196. DOI: 10.1002/2014GL062089.
- Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C.A., Darmenov A., Bosilovich M.G., Reichle R., Wargan K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., da Silva A.M., Gu W., Kim G.-K., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J.E., Partyka G., Pawson S., Putman W., Rienecker M., Schubert S.D., Sienkiewicz M., Zhao B. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2 (MERRA-2) // *J. Climate.* 2017. V. 30, N 14. P. 5419–5454. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.
- Randles C.A., da Silva A.M., Buchard V., Darmenov A., Colarco P.R., Aquila V., Bian H., Nowottnick E.P., Pan X., Smirnov A., Yu H., Govindaraju R. The MERRA-2 Aerosol Assimilation. NASA TM-2016-104606. 2016. V. 45. NASA Global Modeling and Assimilation Office. 132 p. URL: <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/docs/> (last access: 30.11.2019).
- Randles C.A., da Silva A.M., Buchard V., Colarco P.R., Darmenov A., Govindaraju R., Smirnov A., Holben B., Ferrare R., Hair J., Shinzuka Y., Flynn C.J. The MERRA-2 aerosol reanalysis, 1980 onward, Part I: System description and data assimilation evaluation // *J. Climate.* 2017. V. 30, N 17. P. 6823–6850. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0609.1.
- Buchard V., Randles C.A., da Silva A.M., Darmenov A., Colarco P.R., Govindaraju R., Ferrare R., Hair J., Beyersdorf A.J., Ziemba L.D., Yu H. The MERRA-2 aerosol reanalysis, 1980 onward. Part II: Evaluation and case studies // *J. Climate.* 2017. V. 30, N 17. P. 6851–6872. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0613.1.
- Chin M., Ginoux P., Kinne S., Torres O., Holben B.N., Duncan B.N., Martin R.V., Logan J.A., Higurashi A., Nakajima T. Tropospheric aerosol optical thickness from the GOCART model and comparisons with satellite and sun photometer measurements // *J. Atmos. Sci.* 2002. V. 59, N 3. P. 461–483. DOI: 10.1175/1520-0469(2002)059<0461:TAOTFT.2.0.CO>2.
- Colarco P., da Silva A., Chin M., Diehl T. Online simulations of global aerosol distributions in the NASA GEOS-4 model and comparisons to satellite and ground-based aerosol optical depth // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. DOI: 10.1029/2009JD012820.
- Hess M., P. Koepke S.I. Optical properties of aerosols and clouds: The software package OPAC // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1998. V. 79, N 5. P. 831–844. DOI: 10.1175/1520-0477(1998)079<0831:OPOAAC.2.0.CO>2.
- Wofsy S.C. The HIPPO science team and cooperating modellers and satellite team HIAPER Pole-to-Pole Observations (HIPPO): Fine-grained, global-scale measurements of climatically important atmospheric gases and aerosols // *Phil. Trans. Math. Phys. Eng. Sci.* 2011. V. 369, N 1943. P. 2073–2086. URL: <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2010.0313> (last access: 30.11.2019).
- Jacob D.J., Crawford J.H., Maring H., Clarke A.D., Dibb J.E., Emmons L.K., Ferrare R.A., Hostetler C.A., Russell P.B., Singh H.B., Thompson A.M., Shaw G.E., McCauley E., Pederson J.R., Fisher J.A. The Arctic Research of the Composition of the Troposphere from Aircraft and Satellites (ARCTAS) mission: Design, execution, and first results // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V. 10, N 11. P. 5191–5212. URL: <http://www.atmos-chem-phys.net/10/5191/2010/> (last access: 10.11.2019).
- Schmeisser 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 16. P. 11599–11622.
- Виноградова А.А., Копейкин В.М., Смирнов Н.С., Васильева А.В., Иванова Ю.А. Черный углерод в приземном воздухе в районе Печоро-Илычского заповедника: измерения и источники // *Оптика атмосфер. и океана.* 2019. Т. 32, № 6. С. 430–436; Vinogradova A.A., Kopeikin V.M., Smirnov N.S., Vasileva A.V., Ivanova Yu.A. Black carbon in near-surface air in Pechora-Ilych nature reserve: Measurements and sources // *Atmos. Ocean Opt.* 2019. V. 32, N 5. P. 521–527.
- Сакерин С.М., Голобокова Л.П., Кабанов Д.М., Калашникова Д.А., Козлов В.С., Круглинский И.А., Макаров В.И., Макштас А.П., Попова С.А., Радионов В.Ф., Симонова Г.В., Турчинович Ю.С., Ходжер Т.В., Хуриганова О.И., Чанкина О.В., Чернов Д.Г. Результаты измерений физико-химических характеристик атмосферного аэрозоля на научно-исследовательском стационаре «Ледовая база «Мыс Баранова»» в 2018 г. // *Оптика атмосфер. и океана.* 2019. Т. 32, № 6. С. 421–429; Sakerin S.M., Golobokova L.P., Kabanov D.M., Kalashnikova D.A., Kozlov V.S., Kruglinsky I.A., Makarov V.I., Makshatas A.P., Popova S.A.,

- Radionov V.F., Simonova G.V., Turchinovich Yu.S., Khodzher T.V., Khuriganova O.I., Chankina O.V., Chernov D.G.* Measurements of physicochemical characteristics of atmospheric aerosol at research station Ice Base Cape Baranov in 2018 // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 5. P. 511–520.
18. Чернов Д.Г., Козлов В.С., Панченко М.В., Турчинович Ю.С., Радионов В.Ф., Губин А.Б., Прахов А.Н. Особенности изменчивости концентраций аэрозоля и сажи в приземном слое воздуха в Баренцбурге (Шпицберген) в 2011–2013 гг. // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2014. № 4 (102). С. 34–44.
 19. *Popovicheva O.B., Evangelidou N., Eleftheriadis K., Kalogridis A.C., Sitnikov N., Eckhardt S., Stohl A.* Black carbon sources constrained by observations in the Russian High Arctic // *Environ. Sci. Technol.* 2017. V. 51, N 7. P. 3871–3879. DOI: 10.1021/acs.est.6b05832.
 20. *Popovicheva O., Diapouli E., Makshtas 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. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.165> (last access: 30.11.2019).
 21. *Sakerin S.M., Kabanov D.M., Pol'kin V.V., Golobokova L.P., Zenkova P.N., Kessel A.S., Pol'kin Vas.V., Radionov V.F., Terpugova S.A., Urazgildeeva A.V., Khodzher T.V., Khuriganova O.I.* Features of spatial distribution of aerosol characteristics over Arctic seas // *Proc. SPIE*. 2018. V. 10833, N 39. DOI: 10.1117/12.2502013.
 22. *Кирич Д.В., Крутиков Н.О., Лукьянов А.Н., Струнин А.М., Струнин М.А.* Результаты сравнительного анализа сравнения аэрозольных примесей в атмосфере регионов Арктики и Московской области по данным самолетных исследований в 2014–2015 годах // *Тр. Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского*. 2018. Вып. 662. С. 219–223.
 23. *Sharma S., Ishizawa M., Chan D., Lavoué D., Andrews E., Eleftheriadis K., Maksyutov S.* 16-year simulation of Arctic black carbon: Transport, source contribution, and sensitivity analysis on deposition // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2013. V. 118, N 1. P. 943–964.
 24. *Hirdman D., Burkhart J.F., Sodemann H., Eckhardt S., Jefferson A., Quinn P.K., Sharma S., Ström J., Stoh A.* Long-term trends of black carbon and sulphate aerosol in the Arctic: Changes in atmospheric transport and source region emissions // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V. 10, N 19. P. 9351–9368.
 25. *Quinn P.K., Shaw G., Andrews E., Dutton E., Ruoho-Airola T., Gong S.* Arctic haze: Current trends and knowledge gaps // *Tellus B*. 2007. V. 59, N 1. P. 99–114.
 26. *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.
 27. *Evangelidou N., Balkanski Y., Hao W.M., Petkov A., Silverstein R.P., Corley R., Nordgren B.L., Urbansk S.P., Eckhardt S., Stohl A., Tunved P., Crepinsek S., Jefferson A., Sharma S., Nøjgaard J.K., Skov H.* Wildfires in northern Eurasia affect the budget of black carbon in the Arctic – a 12-year retrospective synopsis (2002–2013) // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16. P. 7587–7604.
 28. *Lisok J., Rozwadowska A., Pedersen J.G., Markowicz K.M., Ritter C., Kaminski J.W., Struzewska J., Mazzola M., Udisti R., Becagli S., Gorecka I.* Radiative impact of an extreme Arctic biomass-burning event // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18, N 12. P. 8829–8848.
 29. *Stone R., Anderson G., Shettle E., Andrews E., Loukachine K., Dutton E., Schaaf C., Roman M.* Radiative impact of boreal smoke in the Arctic: Observed and modeled // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2008. V. 13, N D14S16. DOI: 10.1029/2007JD009657.
 30. *Виноградова А.А., Копейкин В.М., Смирнов Н.С.* Мониторинг концентрации черного углерода в приземном воздухе в районе Печоро-Ильчского биосферного заповедника // *Успехи современного естествознания*. 2019. № 11. С. 64–69.
 31. *Asmi E., Kondratyev V., Brus D., Laurila T., Lihavainen H., Backman J., Vakkari V., Aurela M., Hatakka J., Viisanen Y., Uttal T., Ivakhov V., Makshtas A.* Aerosol size distribution seasonal characteristics measured in Tiksi, Russian Arctic // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16, N 3. P. 1271–1287.
 32. *Виноградова А.А., Туткова Т.Б., Иванова Ю.А.* Эпизоды аномально высокой концентрации черного углерода в приземном воздухе в районе станции Тикси, Якутия // *Оптика атмосф. и океана*. 2018. Т. 31, № 10. С. 837–844; *Vinogradova A.A., Titkova T.B., Ivanova Yu.A.* Episodes with anomalously high black carbon concentration in surface air in the region of Tiksi station, Yakutiya // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 1. P. 94–102.
 33. *Виноградова А.А., Васильева А.В.* Черный углерод в воздухе северных районов России: источники, пространственные и временные вариации // *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.
 34. *Виноградова А.А., Туткова Т.Б., Васильева А.В., Иванова Ю.А.* Влияние летних природных пожаров в России на содержание черного углерода в атмосфере над арктическим побережьем Евразии // *Тез. междунар. симпоз. «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД-2019) 24–27 июня 2019, Санкт-Петербург, Петродворец*. С. 134–135. URL: <http://www.rrc.phys.spbu.ru/msard19/thesis.pdf> (last access: 30.11.2019).
 35. *Xu Jun-Wei, Martin R.V., Morrow A., Sharma S., Huang L., Leitch W.R., Burkart J., Schulz H., Zannatta M., Willis M.D., Henze D.K., Lee C.J., Herber A.B., Abbatt J.P.D.* Source attribution of Arctic black carbon constrained by aircraft and surface measurements // *Atmos. Chem. Phys.* 2017. V. 17. P. 11971–11989. URL: <https://doi.org/10.5194/acp-17-11971-2017>.
 36. *Dibb J.E.* Vertical mixing above Summit, Greenland: Insights into seasonal and high frequency variability from the radionuclide tracers ⁷Be and ²¹⁰Pb // *Atmos. Environ.* 2007. V. 41. P. 5020–5030. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.12.005>.
 37. *Stohl A.* Characteristics of atmospheric transport into the Arctic troposphere // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. URL: <https://doi.org/10.1029/005JD006888> (last access: 30.11.2019).
 38. *Evangelidou N., Kylling A., Eckhardt S., Myrniuk V., Stebel K., Paugam R., Zibtev S., Stohl A.* Open fires in Greenland in summer 2017: Transport, deposition and radiative effects of BC, OC and BrC emissions // *Atmos. Chem. Phys.* 2019. V. 19. P. 1393–1411. URL: <https://doi.org/10.5194/acp-19-1393-2019>.

39. Stohl A., Berg T., Burkhardt J.F., Fjaeraa A.M., Forster C., Herber A., Hov O., Lunder C., McMillan W.W., Oltmans S., Shiobara M., Simpson D., Solberg S., Stebel K., Strom J., Torseth K., Treffeisen R., Virkkunen K., Yttri K.E. Arctic smoke – record high air pollution levels in the European Arctic due to agricultural fires in Eastern Europe in spring 2006 // Atmos. Chem. Phys. 2007. V. 7. P. 511–534.

T.B. Zhuravleva, A.V. Artyushina, A.A. Vinogradova, Yu.V. Voronina. **Black carbon in the near-surface atmosphere far away from emission sources: comparison of measurements and MERRA-2 reanalysis data.**

We compare the time variations in monthly average concentrations of black carbon in the surface atmospheric layer, obtained from field measurements ($[BC]$) and from MERRA-2 reanalysis ($[BC]_M$) at four monitoring sites located in the northern part of Russia (Tiksi Hydrometeorological Observatory (HMO), Pechora-Ilych Biosphere Reserve, Alaska (Barrow), and Greenland (Summit)). It is shown that the MERRA-2 reanalysis data for the regions of Tiksi HMO and Barrow not fully reflect the $[BC]$ variations during the year, in contrast to the Pechora-Ilych Nature Reserve, where the differences are within 30–50%. The $[BC]_M$ reanalysis data for the Summit monitoring site qualitatively agree with the measurement data characterizing the BC content in the free troposphere, but they underestimate $[BC]$ by more than 2 times. In general, the analysis showed that the results of the MERRA-2 reanalysis of the monthly average values of the surface concentration of atmospheric black carbon can be used for climate assessments for hard-to-reach northern regions in the warm season with an error of about 30%. Possible reasons for the differences between $[BC]$ and $[BC]_M$ are discussed for different seasons and observation sites.

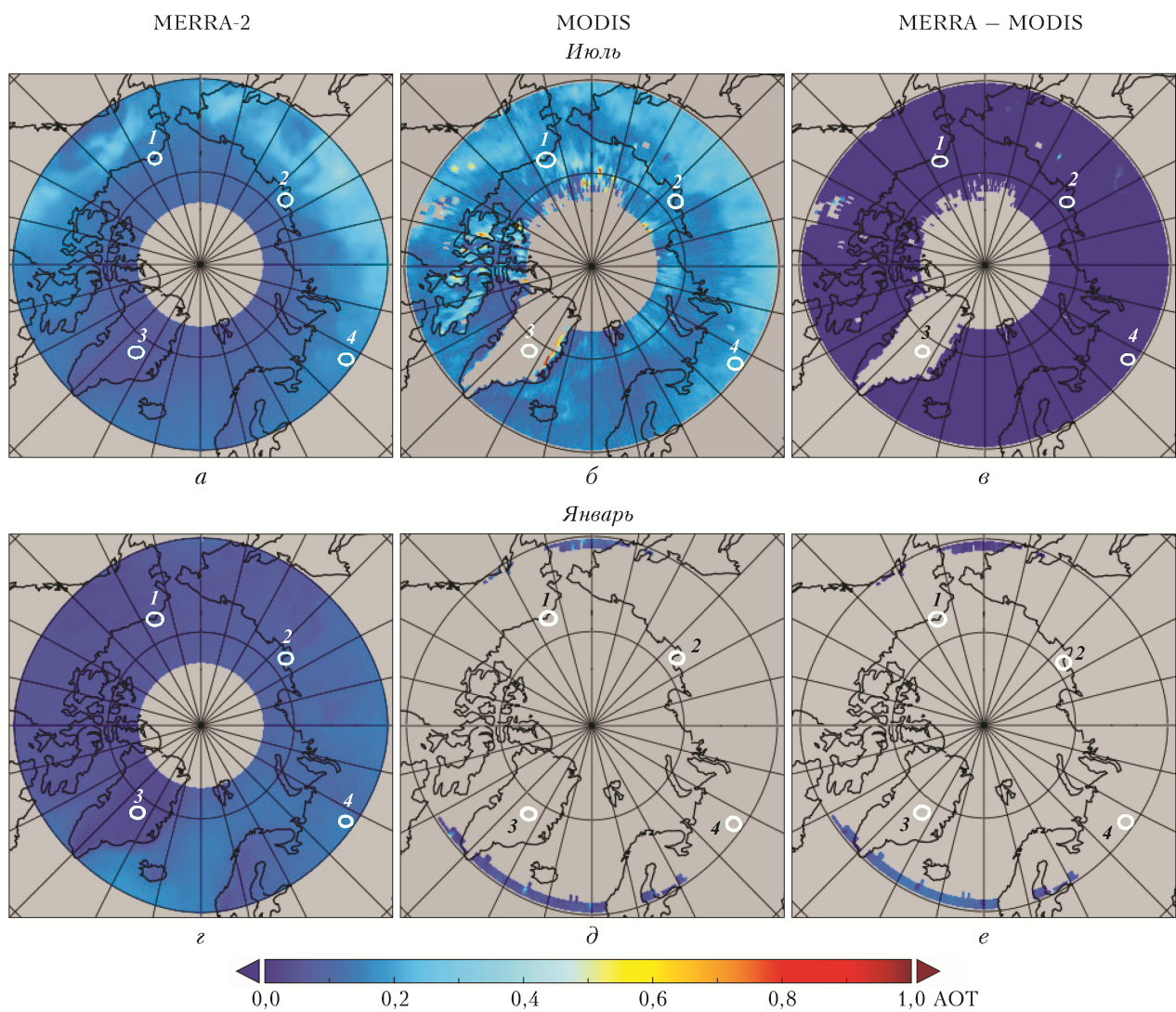


Рис. 1. Пространственное распределение средней AOT ($\lambda = 550$ нм) над территорией Арктики ($60-80^\circ$ с.ш.) по данным реанализа (а, з) и спутникового сканера MODIS (б, д), а также их различий (в, е) для июля (а–в) и января (з–е). Пункты мониторинга: 1 – BRW, 2 – TKS, 3 – SUM, 4 – PIR; период осреднения – 2000–2018 гг.