

Загрязнение воздуха черным углеродом в районе о-ва Врангеля: сравнение источников и вкладов территорий Евразии и Северной Америки

А.А. Виноградова, А.В. Васильева, Ю.А. Иванова*

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

Поступила в редакцию 5.10.2020 г.

Проведен анализ дальнего атмосферного переноса черного углерода (black carbon – BC) в районе о-ва Врангеля с июня по август 2015–2017 гг. Траектории движения воздушных масс рассчитаны с помощью модели HYSPLIT на сайте www.ready.arl.noaa.gov. Использована упрощенная модель переноса BC в атмосфере на основе пространственного распределения функции чувствительности к эмиссиям примеси. Информация о пространственном расположении источников (антропогенного генезиса и природных пожаров) выбросов BC в атмосферу получена с сайтов <http://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=431> и <http://www.globalfiredata.org> соответственно. Проведено сравнение мощностей, пространственного расположения и межгодовых вариаций эмиссий BC в атмосферу от антропогенных источников и пожаров летом на северо-востоке Евразии и на северо-западе Северной Америки.

Ключевые слова: атмосфера, загрязнение, черный углерод, остров Врангеля, дальний перенос в атмосфере, источники черного углерода, вклады Евразии и Америки; atmosphere, pollution, black carbon, the Wrangel Island, long-range atmospheric transport, sources of black carbon, Eurasian and American contributions.

Введение

Природные экосистемы тихоокеанского сектора Арктики, в том числе самые северо-восточные территории России, находятся под влиянием воздушных масс и содержащихся в них веществ, поступающих не только из Евразии, но также в результате трансграничного атмосферного переноса из Северной Америки [1, 2]. Отдельные измерения состава воздуха, проведенные во время рейсов исследовательских судов в морях Северного Ледовитого океана [3, 4], а также на самом о-ве Врангеля [5], не могут использоваться для выявления долговременных закономерностей загрязнения воздуха в этих районах из-за сильных межгодовых вариаций метеорологических и циклонических условий в атмосфере. Регулярный приборный мониторинг загрязнения воздуха в столь удаленных местах весьма проблематичен. Лишь на Аляске уже много лет работает станция наблюдений Barrow (новое название Utqiagvik) [6]. Поэтому наши предыдущие исследования загрязнения воздуха в этом районе, обобщенные в [7], были выполнены путем модельных расчетов дальнего переноса примесей в атмосфере. Оценки проводились для тяжелых металлов антропогенного происхожде-

ния по имеющимся данным об их эмиссиях в атмосферу с территории России и остальных стран Европы [8, 9]. Отсутствие информации об источниках тяжелых металлов на территории американского материка ограничивало наши исследования в отношении тихоокеанского сектора Российской Арктики изучением лишь закономерностей атмосферной циркуляции и дальнего переноса воздушных масс.

В последние десятилетия в связи с очевидными климатическими изменениями обострился интерес к атмосферным примесям, влияющим на энергетический баланс атмосферы, в частности, к черному углероду (black carbon – BC). Эта примесь попадает в атмосферу в результате человеческой деятельности, при неполном сгорании различных углеродсодержащих топлив, а также при горении биомассы во время лесных и сельскохозяйственных пожаров [10, 11]. Развитие в эти же годы методик получения и обработки данных спутниковых дистанционных наблюдений привело к тому, что появились достаточно надежные сведения о положении, мощности и генезисе источников выбросов BC в атмосферу с поверхности Земли. Это позволило использовать для черного углерода в районе о-ва Врангеля разработанную ранее методику модельного мониторинга дальнего переноса аэрозольных примесей.

В настоящей работе приводятся результаты оценки уровня и изменчивости концентрации черного углерода в приземном воздухе в тихоокеанском секторе Арктики в летнее время. Сравняются

* Анна Александровна Виноградова (anvinograd@yandex.ru); Анастасия Васильевна Васильева (av@ifaran.ru); Юлия Алексеевна Иванова (ulia_sml@mail.ru).

вклады в эту концентрацию источников ВС, расположенных на материках Евразия и Америка, а также антропогенных источников и пожаров.

Дальний перенос воздушных масс с континентальных территорий к о-ву Врангеля

Дальний перенос воздушных масс к точке ВР (71,0° с.ш., 175,5° з.д.), расположенной на о-ве Врангеля, изучался с помощью ежесуточных обратных траекторий движения воздушных масс, рассчитанных на сайте Лаборатории воздушных ресурсов ARL NOAA [12] (программа HYSPLIT), для трех летних месяцев 2015–2017 гг. Практически все траектории, по которым воздух поступает к рассматриваемой точке, располагаются над территорией в пределах координат 52–74° с.ш., 110–245° в.д. Для простоты математической обработки материала мы использовали только восточную долготу, продолженную за меридиан 180° в.д., разделяющий Восточное и Западное полушария. Для анализа эта территория была условно разделена по меридиану 190° в.д. на две части, далее называемые RUS и AMER (рис. 1, цв. вкладка). При этом отношение площадей RUS/AMER равно ~1,5.

По данным [7], в течение 30 лет (1986–2016 гг.) дальний перенос воздушных масс к ВР характеризовался последовательным уменьшением частоты поступления воздуха с территорий материков (т.е. воздух на острове становился более морским). При этом отношение частот переноса воздушных масс из Евразии и Северной Америки сохранялось на уровне от 3 до 4. Для рассматриваемых в настоящей работе летних сезонов 2015–2017 гг. и выбранных территорий отношение частот поступления воздуха RUS/AMER в среднем равно 3,55, что хорошо соответствует многолетним данным; однако в сами летние месяцы процессы циркуляции атмосферы были очень изменчивы, в результате чего соотношение частот поступления воздуха с территорий RUS и AMER сильно варьировалось, как это показано на рис. 2.

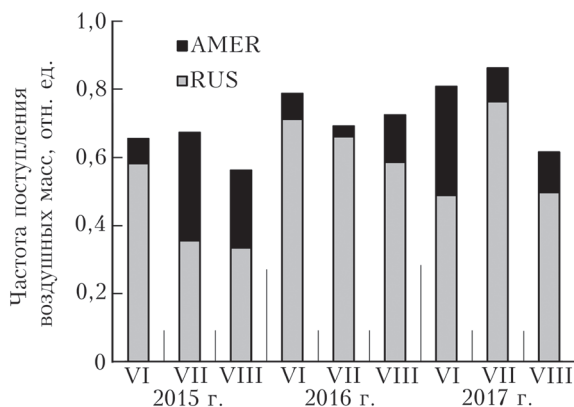


Рис. 2. Соотношение частот поступления воздушных масс к пункту ВР с территорий RUS и AMER в разные летние месяцы

Эмиссии ВС в атмосферу на территориях Евразии и Америки

По оценкам [10], в России, США и Канаде источниками черного углерода, дающими максимальные вклады в его содержание в атмосфере над Арктикой, являются травяные и лесные пожары, а также — из антропогенных источников — открытое сжигание газа (факелы) при нефте- и газодобыче, транспорт и бытовое оборудование. Будем рассматривать ВС в атмосфере: 1) как результат выбросов различных антропогенных источников (бытовое и промышленное отопление, транспорт, добыча углеродсодержащего топлива и т.д.) или 2) как продукт горения биомассы (пожары любого происхождения). Информация об эмиссиях ВС в атмосферу от антропогенных источников и пожаров, а также о расположении соответствующих источников была получена на сайтах [13, 14].

Расположение источников антропогенных эмиссий ВС изменяется в течение года незначительно, а их мощность на территориях RUS и AMER меняется в пределах 10% от месяца к месяцу, составляя летом в среднем за три года 611 т/мес. и 834 т/мес. соответственно. Пространственное распределение антропогенных эмиссий на рассматриваемых территориях России и Северной Америки показано на рис. 1, а. В настоящей работе мы считали антропогенные эмиссии ВС одинаковыми по величине и по пространственному распределению для всех рассматриваемых летних месяцев. Эмиссии от пожаров значительно более изменчивы как в пространстве, так и во времени (см. рис. 1, б–г и рис. 3).

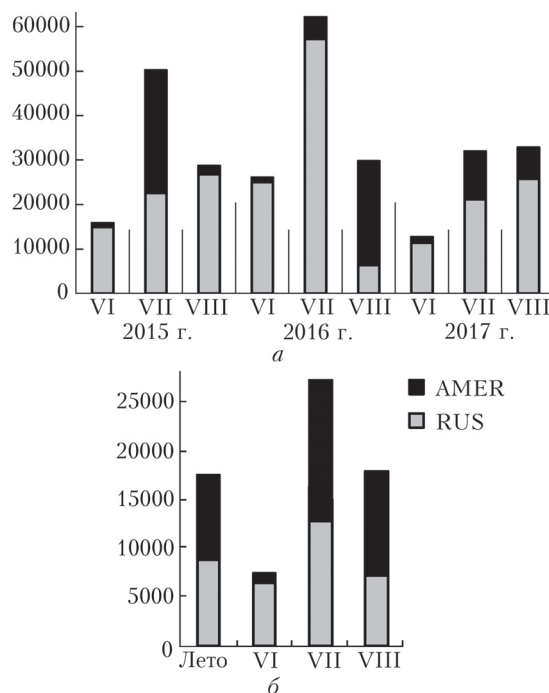


Рис. 3. Изменчивость эмиссий ВС от пожаров на рассматриваемых территориях RUS и AMER: а — в разные летние месяцы; б — в среднем (за три года) по месяцам и за лето в целом

Средние величины летних пожарных эмиссий ВС с территорий RUS и AMER в 2015–2017 гг. почти одинаковы и составляют 8790 и 8760 т/мес. соответственно. Таким образом, летом в среднем в течение рассматриваемых трех лет эмиссии от пожаров на порядок и более превышали антропогенные эмиссии ВС в атмосферу. Однако изменчивость эмиссий ВС от пожаров как внутри летних сезонов, так и от года к году велика (рис. 3).

Коротко о подходе к модельным оценкам концентрации ВС в районе исследования

Для оценки концентрации ВС в воздухе в районе ВР применялась методика, ранее разработанная авторами и подробно описанная в [15]. С ее помощью оценивалось загрязнение атмосферы в удаленных арктических районах антропогенными тяжелыми металлами [7, 16] и черным углеродом [17, 18]. Эффективность переноса примеси в атмосфере зависит от процессов циркуляции последней — от того проходят или нет воздушные массы над районами выбросов примеси в воздух. Длительность движения примеси в атмосфере и пройденное расстояние от источника до рассматриваемого пункта также сказываются на ее количестве, сохранившемся в воздухе. Эти параметры определяются по набору траекторий, использованных для расчетов. Скорость выведения примеси из воздушного потока также является одним из параметров, определяющим абсолютное значение концентрации примеси, остающейся в воздухе в ходе ее распространения. К сожалению, достоверное задание этого параметра весьма затруднительно, особенно для черного углерода, который стимулирует целый ряд изменений физических свойств аэрозольных частиц во время их переноса в атмосфере (см. [10, 19, 20]). В частности, много неопределенностей возникает во влажной холодной атмосфере над Северным Ледовитым океаном, где возможны фазовые переходы атмосферной влаги. Кроме того, скорость осаждения примеси на поверхность сильно зависит от качества подстилающей поверхности, например при переносе над океаном возможны водная или покрытая льдом/снегом поверхность, различные балл волнения и сила ветра, определяющие шероховатость поверхности, и т.д.

Для каждого изучаемого месяца для ВР были рассчитаны распределения функции чувствительности к эмиссиям примеси с пространственным разрешением $1^\circ \times 1^\circ$ (широта $\times$ долгота). Эти распределения далее умножаются в соответствующих ячейках на величины эмиссий ВС в атмосферу (см. рис. 1). В результате получаем пространственное распределение вкладов источников ВС, расположенных в различных ячейках сетки, в концентрацию ВС в районе ВР. Суммированием по заданной тер-

ритории получаем концентрацию ВС в изучаемой точке ВР, создаваемую источниками на территории, откуда поступают воздушные массы и ВС.

Обсуждение результатов модельных оценок

Антропогенный ВС

По данным рис. 4, а можно сравнить соотношения вкладов антропогенных источников территорий России и Северной Америки в концентрацию ВС в приземном воздухе на о-ве Врангеля 2015–2017 гг. Вариации от месяца к месяцу отражают только изменения процессов циркуляции атмосферы в тихоокеанском секторе Арктики (попадание или непопадание выбросов в потоки воздуха, движущегося к ВР, длительность и дальность переноса примеси). Величины эмиссий ВС и расположение антропогенных источников в наших расчетах все 9 мес. предполагались неизменными (см. распределения на рис. 1, а).

В целом в летнее время вклад российских антропогенных источников ВС в приземную концентрацию ВС в изучаемом районе на два порядка превосходит вклад антропогенных источников Америки. Такие сильные различия связаны не столько с большей площадью рассматриваемой российской территории или с преимущественным переносом воздуха с нее (см. рис. 3), сколько с большей удаленностью источников ВС в Америке от пункта ВР, а также с большей скоростью осаждения примеси на водную поверхность, чем на сушу. Американские источники вносят значимую долю в концентрацию антропогенного ВС в воздухе на о-ве Врангеля лишь в августе 2015 г. — почти 7%.

Заметим, что аналогичные оценки, выполненные нами для зимних месяцев (когда источники ВС только антропогенные), дали значения концентрации ВС заметно выше и с меньшими относительными вариациями — $(30,5 \pm 9,6)$ нг/м³, что хорошо соответствует измерениям в течение многих лет на ближайшей арктической станции наблюдений Barrow [10]. Как уже отмечалось, более высокие концентрации ВС зимой обусловлены большим временем жизни примеси в атмосфере над заснеженной/заледеленой поверхностью [15]. При этом зимой и средний вклад более удаленных американских источников выше — 16%.

ВС от пожаров

Соотношения концентрации ВС от пожаров в воздухе на о-ве Врангеля (рис. 4, б) формируются вариациями (по месяцам) как циркуляционных процессов (см. рис. 3), так и расположения пожаров и интенсивности выбросов ВС от них в атмосферу (см. рис. 1, б–г и рис. 2). Вклады пожаров на территории России в целом также значительно

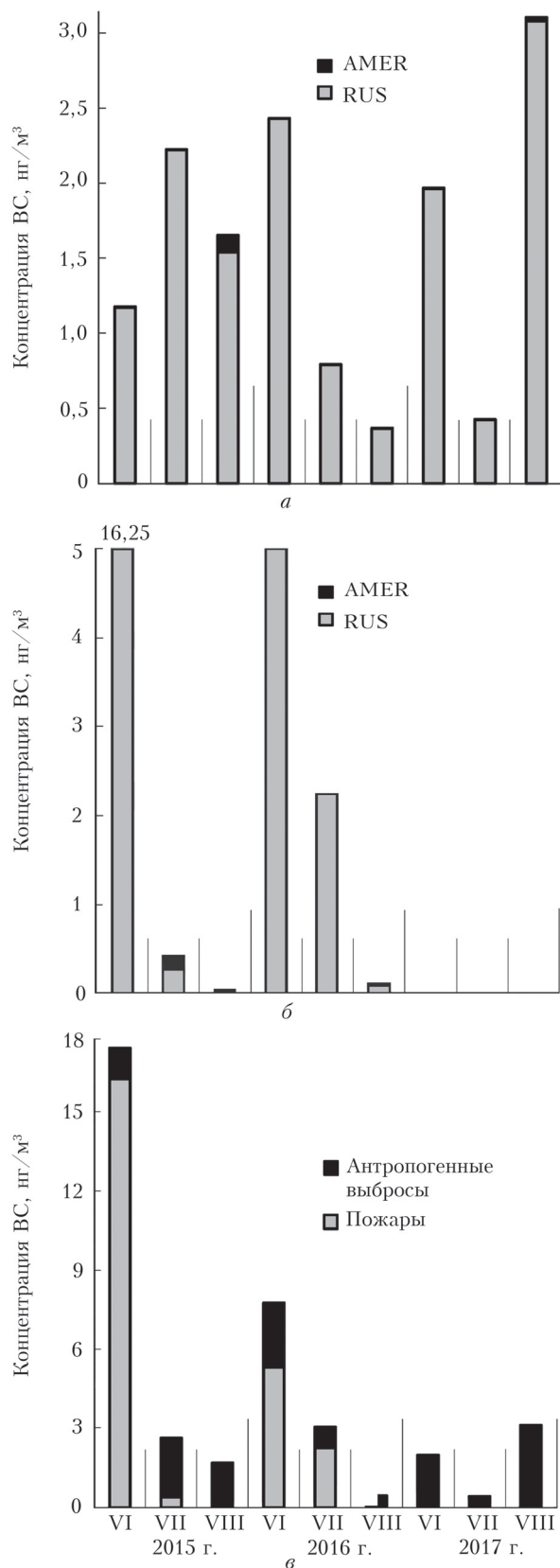


Рис. 4. Соотношение вкладов источников в концентрацию ВС в приземном воздухе в районе ВР: *а* – антропогенных источников, *б* – пожаров на территориях RUS и AMER, *в* – антропогенных источников и пожаров без разделения по территориям

превышают вклады американских пожаров. Лишь в июле 2015 г. вклад последних был чуть выше 37%, хотя в среднем (по данным за девять рассматриваемых летних месяцев) вклад пожарных эмиссий ВС с территории AMER формирует лишь $\sim 0,7\%$ концентрации ВС в воздухе на о-ве Врангеля, создаваемой пожарами. Оценки, представленные на рис. 4, *а*, хорошо соответствуют приземной концентрации ВС, измеренной летом на станции Bagtow [10].

Общие замечания

Если сравнивать влияние источников ВС различного генезиса (антропогенных и пожарных), не различая их по территориям происхождения, на среднемесячную концентрацию ВС в атмосфере изучаемого района, их вклады изменяются по месяцам очень сильно (рис. 4, *в*). Но общая оценка показывает, что в среднем летом 2015–2017 гг. антропогенные источники и пожары создавали на о-ве Врангеля мало различающиеся концентрации ВС: $(1,6 \pm 1,0)$ и $(2,7 \pm 5,4)$ нг/м³ соответственно, с отношением $\sim 3:5$.

Следует напомнить, что в случае смещения пункта, для которого проводятся исследования, в пределах тихоокеанского сектора Арктики влияние евразийских и американских источников ВС будет непредсказуемо меняться, поскольку изменится расстояние до соответствующих источников. Можно лишь предполагать, что в северном/южном направлении влияние континентальных источников ВС должно ослабевать/усиливаться. Перемещение пункта исследований в направлении запад – восток приведет к непредсказуемым искажениям соотношений вкладов территорий RUS и AMER для о-ва Врангеля.

Заметим, что среднемесячные оценки концентрации ВС в воздухе не являются актуальными для радиационных оценок и прогнозов, поскольку вариации среднесуточных концентраций ВС летом могут быть на 2–3 порядка больше среднемесячного значения, как, например, на ст. Тикси [21], заметно повышая температуру воздуха в отдельные дни. В эти же дни принципиально меняются оптические и микрофизические свойства атмосферы, формируя ее аномальные радиационные характеристики [22].

Заключение

Изучение пространственного распределения траекторий движения воздушных масс в район о-ва Врангеля показало, что летом 2015–2017 гг. перенос воздушных масс и атмосферных примесей происходил с территории, расположенной севернее 52° с.ш., между 110 и 245° в.д. В настоящей работе она условно разбивалась по долготе 190° в.д. на российскую и американскую части с отношением соответствующих площадей $\sim 1,5$. В среднем частоты переноса воздуха к ВР с этих территорий были $\sim 55\%$ и $\sim 16\%$.

Эмиссии ВС летом от антропогенных источников на территориях RUS и AMER составили 610 и 830 т/мес. с вариациями среднемесячных значений не более 10%; эмиссии от пожаров при этом были в среднем почти равными, ~8800 т/мес., но очень изменчивы от месяца к месяцу, стандартные отклонения превысили 100%.

В летнее время года вклады российских источников ВС в концентрацию ВС в атмосфере в районе о-ва Врангеля абсолютно преобладают — как для антропогенных, так и для пожарных эмиссий. В отдельные месяцы максимальные вклады с территории американского материка достигали 7% по антропогенному ВС и 37% по ВС от пожаров. Средняя концентрация ВС в приземном воздухе в районе ВР летом была $\sim 4,5 \pm 5,4$ нг/м³, в то время как аналогичные оценки концентрации ВС зимой составили $\sim 30 \pm 10$ нг/м³.

Среднемесячные показатели концентрации ВС в воздухе вряд ли являются актуальными для радиационных оценок и прогнозов, поскольку вариации среднесуточных концентраций ВС летом могут быть на 1–2 порядка выше, что может привести к формированию аномальных радиационных характеристик атмосферы во время таких эпизодов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-05-60183).

- Hirdman D., Sodemann H., Eckhardt S., Burkhardt J.F., Jefferson A., Mefford T., Quinn P.K., Sharma S., Strom J., Stohl A. Source identification of short-lived air pollutants in the Arctic using statistical analysis of measurement data and particle dispersion model output // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V. 10, N 2. P. 669–693.
- Cheng M.-D. Geolocating Russian sources for Arctic black carbon // *Atmos. Environ.* 2014. V. 92, N 4. P. 398–410.
- Радионых В.Ф., Кабанов Д.М., Полькин В.В., Сакерин С.М., Изосимова О.Н. Характеристики аэрозоля над арктическими морями Евразии: результаты измерений 2018 года и среднее пространственное распределение в летне-осенние периоды 2007–2018 годов // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2019. Т. 65, № 4. С. 405–421.
- Park J., Dall'Osto M., Park K., Gim Y., Kang H.J., Jang E., Park K.-T., Park M., Yum S.S., Jung J., Lee B.Y., Yoon Y.J. Shipborne observations reveal contrasting Arctic marine, Arctic terrestrial and Pacific marine aerosol properties // *Atmos. Chem. Phys.* 2020. V. 20, N 5. P. 5573–5590.
- Fukasawa T., Ohta S., Murao N., Yamagata S., Makarov V.N. Aerosol observations in the Siberian Arctic // *Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol.* 1997. V. 11. P. 150–160.
- International Arctic Systems for Observing the Atmosphere. URL: <https://psl.noaa.gov/iasoa/> (last access: 5.10.2020).
- Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. Атмосферный перенос антропогенных примесей в арктические районы России (1986–2010 гг.) // *Оптика атмосф. и океана*. 2012. Т. 25, № 6. С. 475–483; *Vinogradova A.A., Ponomareva T.Ya. Atmospheric transport of anthropogenic impurities to the Russian Arctic (1986–2010) // Atmos. Ocean Opt.* 2012. V. 25, N 6. P. 414–422.
- Недпре А.Ю. Ежегодник выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух городов и регионов Российской Федерации за 2010 год. СПб: НИИ Атмосфера, 2011. 560 с.
- Метеорологический синтезирующий центр «Восток». URL: <http://www.msceast.org> (дата обращения: 5.10.2020).
- 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.
- Evangelidou N., Balkanski Y., Hao W.M., Petkov A., Silverstein R.P., Corley R., Nordgren B.L., Urbanski S.P., Eckhardt S., Stohl A., Tunved P., Crepinsek S., Jefferson A., Sharma S., Nuijgaard 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, N 12. P. 7587–7604.
- ARL NOAA. Air Resources Laboratory. URL: <http://www.arl.noaa.gov/ready/> (last access: 5.10.2020).
- EDGAR. Emissions database for Global Atmospheric Research. URL: <http://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=431> (last access: 5.10.2020).
- GFED. Global Fire Emissions Database. URL: <http://www.globalfiredata.org> (last access: 5.10.2020).
- Виноградова А.А. Дистанционная оценка влияния загрязнения атмосферы на удаленные территории // *Геофиз. процессы и биосф.* 2014. Т. 13, № 4. С. 5–20.
- Виноградова А.А., Иванова Ю.А. Перенос воздушных масс и загрязнений к арктическим островам России (1986–2016): долговременные, межгодовые и сезонные вариации // *Геофиз. процессы и биосф.* 2017. Т. 16, № 4. С. 5–20.
- Виноградова А.А., Смирнов Н.С., Коротков В.Н., Романовская А.А. Лесные пожары в Сибири и на Дальнем Востоке: эмиссии и атмосферный перенос черного углерода в Арктику // *Оптика атмосф. и океана*. 2015. Т. 28, № 6. С. 438–445; *Vinogradova A.A., Smirnov N.S., Korotkov V.N., Romanovskaya A.A. Forest fires in Siberia and the Far East: Emissions and atmospheric transport of black carbon to the Arctic // Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 6. P. 566–574.
- 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.
- 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., 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.
- Виноградова А.А., Веремейчик А.О. Модельные оценки содержания антропогенной сажи (black carbon) в атмосфере Российской Арктики // *Оптика атмосф. и океана*. 2013. Т. 26, № 6. С. 443–451.
- Виноградова А.А., Туткова Т.Б. Температура воздуха и концентрация черного углерода в приземной атмосфере в районе Тикси, Якутия // *Геофиз. процессы и биосф.* 2019. Т. 18, № 4. С. 15–21.
- Журавлева Т.Б., Насртдинов И.М., Виноградова А.А. Прямые радиационные эффекты дымового аэрозоля в районе ст. Тикси (Российская Арктика):

предварительные результаты // Оптика атмосф. и океана. 2019. Т. 32, № 1. С. 29–38; *Zhuravleva T.B., Nasrtdinov I.M., Vinogradova A.A.* Direct

radiative effects of smoke aerosol in the region of Tiksi station (Russian Arctic): Preliminary results // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 3. P. 296–305.

A.A. Vinogradova, A.V. Vasileva, Yu.A. Ivanova. **Black carbon air pollution near the Wrangel Island: comparison of Eurasian and American sources and their contributions.**

We analyze long-range atmospheric transport of black carbon (BC) to the Wrangel Island in the summer months (June–August) of 2015–2017. Air mass trajectories were calculated using the HYSPLIT model on the ARL NOAA website www.ready.arl.noaa.gov. The simplified model of an aerosol impurity transport in the atmosphere based on spatial distribution of sensitivity function to impurity emissions was used. The spatial locations of BC sources (anthropogenic and wildfires) and their emissions were taken from the websites <http://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=431> and <http://www.globalfiredata.org>, respectively. We study and compare intensities, spatial locations, and interannual variations in BC anthropogenic and wildfire emissions to the atmosphere from the North-Eastern Eurasia and the North-Western North America. The contribution of Eurasian sources absolutely prevails over the contribution of American ones in surface BC concentration at the Wrangel Island. But, on the average, summertime contributions from wildfires and anthropogenic sources (without dividing them by territories) do not greatly differ, with the ratio ~ 5:3.

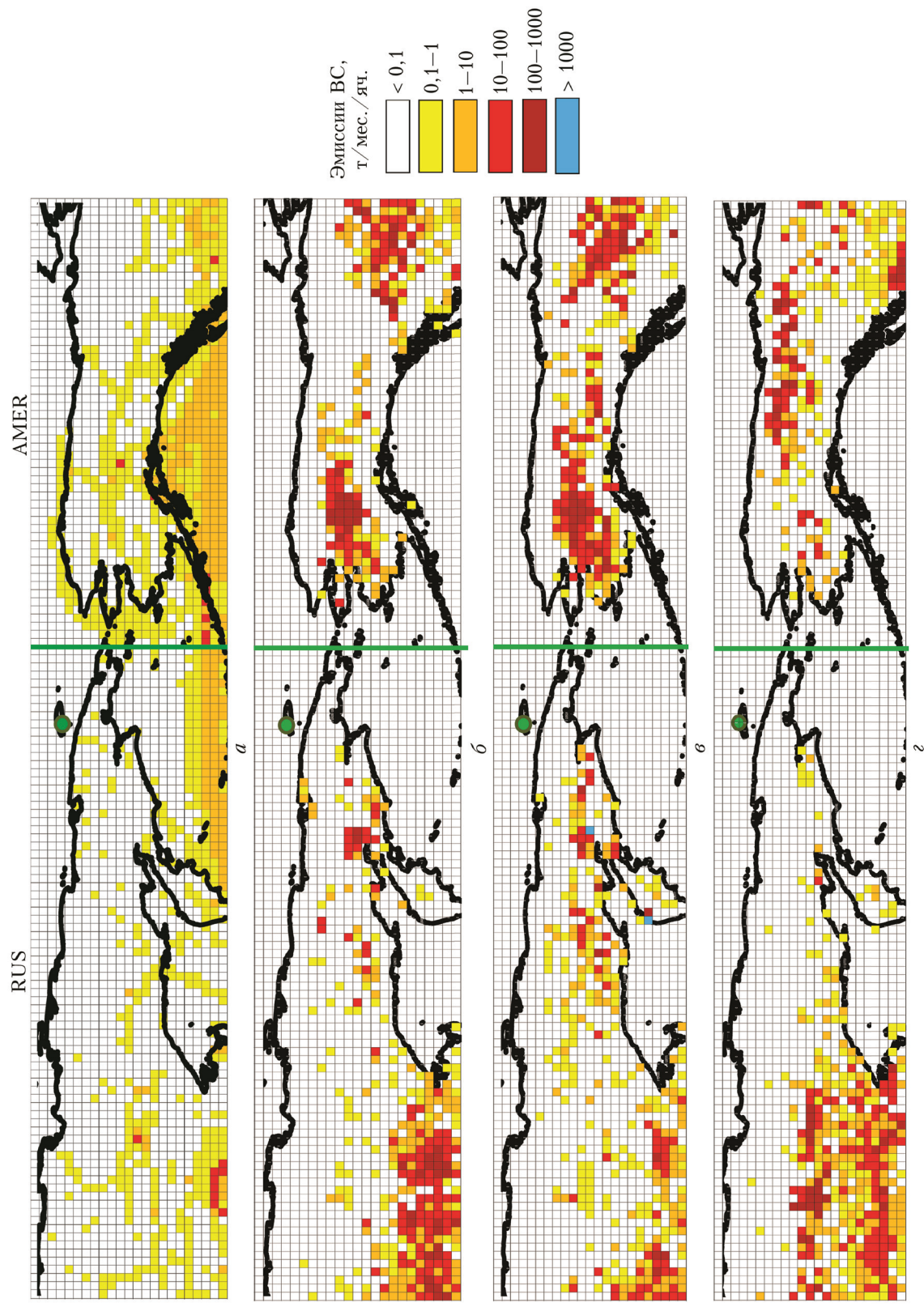


Рис. 1. Пространственные распределения (ячейки $1^\circ \times 1^\circ$) эмиссий CO_2 на территориях RUS и AMER в среднем за летние месяцы: а – антропогенные эмиссии; б–г – эмиссии от пожаров в 2015–2017 гг. соответственно