

ЛЕСНЫЕ ПОЖАРЫ КАК ИСТОЧНИК ЧЕРНОГО УГЛЕРОДА В АРКТИКЕ ЛЕТОМ 2022 Г.

О. Б. Поповичева, М. А. Чичаева, Р. Г. Ковач, Н. С. Касимов

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (Москва, Российская Федерация)

В. О. Кобелев

Московское отделение Русского географического общества (Москва, Российская Федерация)

А. И. Синицкий

ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики» (Салехард, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 28 октября 2022 г.

Оценка аэрозольного загрязнения атмосферы высокоширотных районов Арктики – одна из важнейших экологических и климатических проблем. Летом 2022 г. в результате аномальной температуры и дефицита осадков площади пожаров в Западной Сибири и европейской России достигли рекордных масштабов. На полярной аэрозольной станции МГУ «Остров Белый» (Карское море) ведутся непрерывные аэталометрические измерения климатически значимого компонента атмосферы – черного углерода. В августе 2022 г. зарегистрировано семь эпизодов загрязнений, значительно превышающих фоновый уровень, типичный для арктического лета. Анализ поглощающей способности аэрозолей в широком диапазоне солнечного излучения выявил значительное влияние шлейфов лесных пожаров на аэрозольный состав арктической атмосферы. Распределение высоких концентраций черного углерода в зависимости от направления и скорости ветра указало на южное направление как источник высоких загрязнений. Региональное распределение источников черного углерода, рассчитанное методом отнесения траекторий переноса воздушных масс к измеряемым концентрациям на острове Белый, идентифицирует регионы Западной Сибири, северной и центральной областей европейской России, степных районов Восточно-Европейской равнины и южного Урала, дымовые эмиссии пожаров которых внесли наибольший вклад в состав климатически активного аэрозольного компонента атмосферы.

Ключевые слова: загрязнение атмосферы, черный углерод, лесные пожары, перенос воздушных масс.

Введение

Характерное для современного глобального потепления распределение тенденций приповерхностной температуры и осадков на севере Евразии свидетельствует об ее определяющем вкладе в изменение климата Северного полушария [1]. Вариации крупномасштабной атмосферной циркуляции, сопровождающие изменения климата на севере Евразии, приводят к аномальной жаре, засухам и, как следствие, к сильным пожарам [1]. Отмечаются особенности формирования летней жары на европейской территории России в контексте общих изменений климата [2]. Лесные и сельскохозяйственные пожары, в которых ежегодно сгорают миллионы

тонн биомассы, оказывают значительное влияние на радиационный баланс атмосферы, облачность и климатическую систему Северного полушария [3]. Дымовые эмиссии пожаров в бореальных лесах и лесах умеренных широт вносят существенный вклад в глобальный баланс углерода, являясь источником климатически активных аэрозолей на региональном уровне [4]. Экологически опасные компоненты дыма в шлейфах пожаров могут распространяться на обширные территории. Зарегистрировано влияние широкомасштабного транспорта дымовых эмиссий из европейской России в Европу [5]. Шлейфы крупных лесных пожаров в Восточной Сибири привели к увеличению концентрации аэрозолей над озером Байкал [6], а перенесенные вдоль трансарктического пути — в западной Канаде [7]. В Японии наблюдалось ухудшение качества воздуха под действием

дымов сибирских пожаров [8]. Растущая антропогенная нагрузка на окружающую среду и климатические изменения повышают уровень пожарной активности, что в результате наносит большой ущерб экономике регионов и здоровью населения [9].

При горении биомассы происходит образование многокомпонентных аэрозолей разного состава и свойств, зависящих от условий сжигания, вида растительности, влажности и минерализации почвы [10—12]. Открытое высокотемпературное пламенное горение является источником образования черного углерода (BC, black carbon), многообразные соединения органического углерода (OC, organic carbon) доминируют в продуктах пиролизного сжигания (тления) при низких температурах [13; 14]. Длительные наблюдения выявили значительное влияние верховых и низовых лесных пожаров на уровень концентрации черного углерода [15].

Арктический регион особенно подвержен воздействию крупномасштабных эмиссий антропогенных источников и лесных пожаров [16]. В зимне-весенний период из-за комбинации интенсивного дальнего переноса антропогенных эмиссий и температурной инверсии наблюдается явление арктической дымки, в теплые сезоны устойчивость атмосферы уменьшается, и концентрация аэрозолей падает [17]. Черный углерод в составе продуктов горения природных топлив и биомасс хорошо поглощает солнечное излучение, оказывает значительное воздействие на климат Арктики [18]. Рост концентрации черного углерода с начала 1980-х годов с учетом охлаждающей способности сульфатов привел к увеличению температуры поверхности на $0,29^{\circ}\text{C}$, что внесло значительный вклад в потепление региона [19]. В настоящее время черный углерод признан климатически значимым компонентом, вторым после углекислого газа [17]. Фракция высокомолекулярного OC, называемая коричневым углеродом (BrC, brown carbon), поглощает солнечное излучение в ультрафиолетовом диапазоне, внося значительный вклад в нагрев атмосферы региона.

В весенне-летние сезоны шлейфы пожаров достигают прибрежных районов российского сектора Арктики, где наблюдаются высокие концентрации BC — до $1,5 \text{ мкг/м}^3$ по сравнению с уровнем около 20 нг/м^3 в удаленных районах [20]. Весенние пожары в Сибири удваивают фоновый уровень загрязнений в арктическом регионе Северной Америки [21]. Сезонные циклы черного углерода, определенные в десяти полярных обсерваториях, продемонстрировали низкий уровень загрязнений летом, изредка нарушаемый переносом дымовых эмиссий пожаров с континента [22]. Значительная сезонная изменчивость наблюдалась на российских полярных станциях гидрометеорологической обсерватории Тикси (побережье Карского моря) и Ледовой базе «Мыс Баранова» (архипелаг Северная Земля, восточносибирский сектор Арктики) с максимумом концентрации черного углерода зимой $245 \pm 169 \text{ нг/м}^3$

и низким фоновым уровнем $94,6 \pm 84,7 \text{ нг/м}^3$ летом [23—25]. Сельскохозяйственные пожары в европейской России и на юге Сибири являются важным источником эмиссий и загрязнений Арктики [26]. Лесные пожары на территории Сибири случаются в весенние и летние месяцы с максимальным количеством площадей, охваченных пожарами во второй половине лета [9].

Аномально большие площади, пройденные огнем, и объемы эмиссий аэрозолей были зарегистрированы в Сибири в 2019 г. [9], когда от природных пожаров пострадали территории площадью 72,4 тыс. км², что составило 42% площадей природных пожаров в тот год на всей территории России. Причиной явились многодневная адвекция тепла и дефицит осадков, способствовавшие увеличению класса пожарной опасности и росту концентраций вредных газовых примесей и аэрозолей в атмосфере. Условия циркуляции, сопутствующие периодам сильных пожаров, приводили как к ослаблению переноса черного углерода в Арктику летом 2010 г., когда траектории воздушных масс проходили в стороне от основных очагов пожаров и не обогащались эмиссиями горения; так и к увеличению концентрации черного углерода летом 2012 г., когда имел место перенос из районов крупномасштабных пожаров в Якутии [27].

Лето 2022 г., согласно сводкам Гидрометцентра России (<https://meteoinfo.ru>), оказалось засушливым и жарким, третьим в истории метеонаблюдений по достижению рекордных температур после 2021 и 2016 гг. Пожарная ситуация определила необходимость количественного анализа последствий переноса дымовых эмиссий в Арктику, позволяющего не только оценить уровень загрязнений и степень опасности их воздействия на окружающую среду, но и идентифицировать регионы наиболее значительных источников климатически активных аэрозольных компонентов атмосферы.

В 2019 г. на острове Белый, расположенном в Карском море, была установлена исследовательская полярная аэрозольная станция МГУ (<https://peexhq.home.blog/2019/12/11/new-research-aerosol-stations-in-the-russian-arctic>). Расположение станции на севере Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) (рис. 1), на пути выноса крупномасштабных эмиссий из промышленных регионов Западной Сибири, населенных и промышленных регионов Европы и Азии предоставляет уникальную возможность для изучения аэрозольного состава атмосферы Арктики. В результате непрерывных измерений уровня загрязнений атмосферы черным углеродом был определен значительный вклад факельного сжигания газа в нефтегазодобывающих регионах Западной Сибири, Казахстана, Поволжья, Урала и Республики Коми, эмиссий транспортного и жилого секторов в холодный период года, а также сельскохозяйственных и лесных пожаров весной и летом [28].

Данная работа посвящена изучению аэрозольной нагрузки атмосферы по данным измерений, выпол-

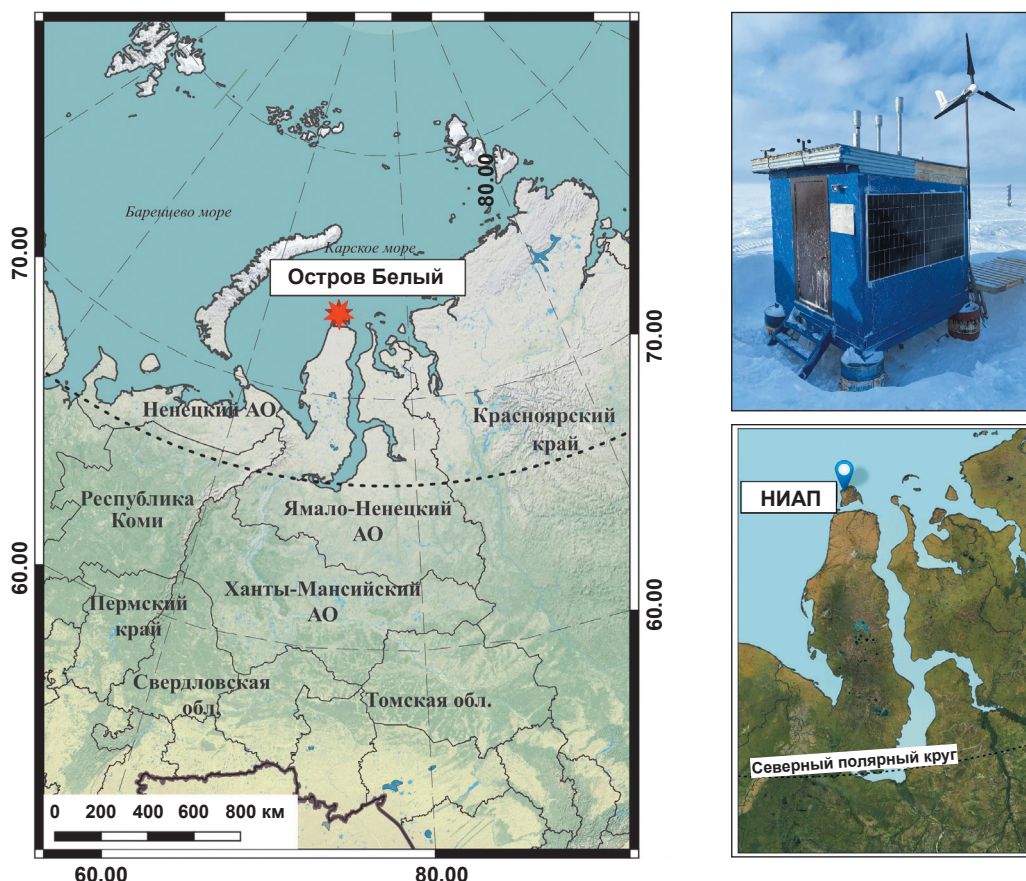


Рис. 1. Слева: расположение полярной станции МГУ «Остров Белый» на острове Белый (73°20'7,57"N, 70°4'49,05"E) в Карском море. Справа: павильон станции и его расположение на острове Белый (НИАП – научно-исследовательский аэрозольный пост). Составлено авторами на картографической основе ESRI Satellite <https://server.arcgisonline.com>
 Fig. 1. On the left: location of the MSU polar station "Bely Island" on Bely Island (73°20'7.57"N, 70°4'49.05"E) in the Kara Sea. On the right: location of station pavilion on Bely Island (НИАП – scientific research aerosol post). Based on ESRI Satellite <https://server.arcgisonline.com>

ненных на инструментальном комплексе полярной аэрозольной станции «Остров Белый» летом 2022 г. Анализируются многократные эпизоды загрязнений в августе 2022 г., в которых концентрация черного углерода значительно превышала фоновый уровень, характерный для летнего периода. Измерения поглощающей способности аэрозолей в широком диапазоне солнечного излучения позволяют провести оценки влияния шлейфов лесных пожаров на аэрозольный состав атмосферы. На основе траекторного анализа переноса воздушных масс во время эпизодов загрязнений на острове Белый моделируется пространственное распределение источников черного углерода и определяются регионы источников пожарных эмиссий в августе 2022 г.

Природные пожары летом 2022 г.

Июнь 2022 г. на территории России был умеренно теплым, на большей части страны зарегистрирована среднемесячная температура выше нормы на 2—3°C (<https://meteoinfo.ru>). Заметно теплее оказался июль 2022 г., превышение составило от 2 до

7°C. Август 2022 г. стал пятым самым теплым периодом в метеорологической летописи с 1891 г. Жаркая погода, державшаяся в центральных и северных районах в конце июля, с наступлением августа захватила практически всю европейскую территорию. В центральном районе европейской части страны температура воздуха достигала 30—35°C. Территории европейской России, а также Ханты-Мансийского автономного округа (ХМАО) и ЯНАО находились в области положительных температурных аномалий, среднемесячное отклонение составило 2—4°C (рис. 2). 12 августа в ХМАО и ЯНАО отклонение температур от среднемесячных достигло 12°C (<https://www.ventusky.com>).

Атмосферное давление составило 1005—1010 Па над районами крайнего Севера, где расположился относительный барический минимум (<https://meteoinfo.ru>) (рис. 3). В это время над континентальной частью наблюдались максимумы атмосферного давления до 1020 Па, определившие перемещение воздушных масс с континента в высокоширотные области Северного Ледовитого океана.

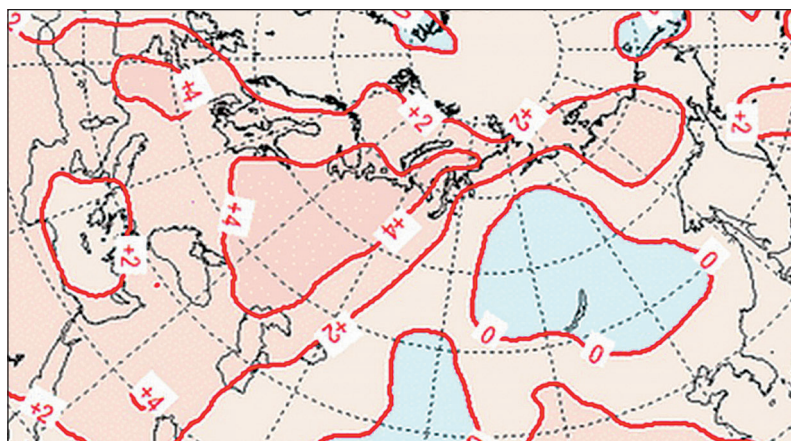


Рис. 2. Карта аномалий температуры воздуха на высоте 2 м над уровнем земли в августе 2022 г. Составлено авторами по данным <https://meteoinfo.ru>
 Fig. 2. Map of air temperature anomalies at 2 m AGL in August 2022. Based on <https://meteoinfo.ru>

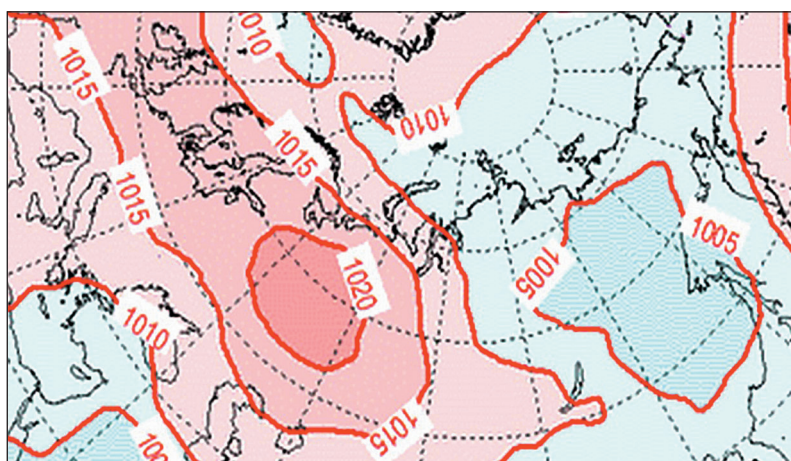


Рис. 3. Барическое поле на уровне моря в августе 2022 г. Составлено авторами по данным <https://meteoinfo.ru>
 Fig. 3. Baric field at sea level in August 2022. Based on <https://meteoinfo.ru>

По данным модели GFS Американского национального управления по океану и атмосфере NOAA (<https://www.ventusky.com>), «на европейской территории России суммы атмосферных осадков за июнь и июль не достигли нормы, дефицит осадков составил –10...–40 мм», в августе 2022 г. территория европейской России и Западной Сибири находилась в области дефицита осадков от –10 до –100 мм. Температурные аномалии и засушливая погода повлекли за собой возникновение пожароопасной ситуации как в северных областях, так и на большей части площади европейской России.

По данным дистанционного мониторинга ФБУ «Авиалесоохрана» (<https://aviales.ru/>), август характеризуется максимальным числом и площадью пожаров, зарегистрированных в Западной Сибири: в ЯНАО — 11 628 га, в ХМАО — 349 525 га. Их площадь превысила территории, охваченные пожарами в июле, в три и два раза соответственно. В ев-

ропейской России по площади, пройденной огнем, доминировали Республика Коми (24 730 га), Рязанская (24 416 га) и Нижегородская (7561 га) области. На территории ЯНАО в 2022 г. пик пожарной опасности пришелся на вторую половину июля и начало августа, когда было зарегистрировано 397 природных пожаров (<https://aviales.ru/rorup.aspx?news=7551>). Самый масштабный лесной пожар с 7 по 15 августа охватил 800 га. В ХМАО с начала пожароопасного сезона (с 22 апреля по 31 августа 2022 г.) было ликвидировано 432 лесных пожара. В европейской России лидерами по числу пожаров стали Республика Коми (443), Нижегородская (91) и Рязанская (50) области.

Методы измерений на острове Белый

Непрерывные измерения уровня концентрации черного углерода проводятся на базе полярной аэрозольной станции МГУ «Остров Белый» (см. рис. 1). Методика обработки данных учитывает местонахождение метеостанции им. М. В. Попова на юго-востоке от павильона станции, где работает дизельный генератор, являющийся единственным локальным источником загрязнения на острове. Главным преимуществом научно-исследовательского аэрозольного поста является

его изоляция от антропогенных источников в отличие от гидрометеорологической обсерватории «Тикси», находящейся под воздействием выбросов близлежащего поселка Тикси [29]. Для обработки метеопараметров использовались данные с сайта погоды (<https://rp5.ru/>). Измерения черного углерода, проведенные при направлении ветра с метеостанции, исключались из анализа.

Система отбора проб аэрозолей в реальном времени специально разработана для суровых арктических условий, снабжена системой обогрева и защиты от сильных ветров. Аэталометр AE33 (Magee Scientific) измеряет поглощение света частицами, осаждающимися на фильтре при прокачке воздуха с разными скоростями потока [30], на семи длинах волн от ультрафиолетового (470 нм) до инфракрасного (950 нм) диапазонов с разрешением 1 мин. Поглощение на длине волны 880 нм пересчитывается в эквивалентную концентрацию чер-

ного углерода eBC(880) с массовым коэффициентом $7,7 \text{ м}^2/\text{г}$. Спектральная зависимость позволяет учесть увеличенное поглощение фракции высокомолекулярного органического углерода в ультрафиолетовом диапазоне излучения по сравнению с инфракрасным [31]. В данной работе разница между eBC(470) и eBC(880) является индикатором влияния лесных пожаров и обозначается DeltaC. Эта величина оказывается значительной в эмиссиях сжигания биомасс [32; 33].

Фоновые аэрозольные концентрации в Арктике определяются в отсутствие влияния локального и регионального загрязнения [29; 34]. Согласно исследованиям, проведенным в 2019—2020 гг., фоновая концентрация черного углерода на острове Белый составляет $10 \text{ нг}/\text{м}^3$. Длительные события, в течении которых концентрация eBC превышала пороговое значение, равное 80 перцентилем выборки ($90 \text{ нг}/\text{м}^3$), были определены как эпизоды загрязнений [28].

Для исследования пространственной неоднородности распределения черного углерода применена методика построения розы загрязнений в полярных координатах направления и скорости ветра [35], что позволяет определить направление источника высоких концентраций для точки мониторинга [36].

Метод отнесения траекторий переноса воздушных масс к концентрации загрязнений в момент их прихода в точку наблюдений (concentration weight trajectories) [37] позволяет определить местонахождение потенциальных источников. Концентрация \bar{C}_{ij} для каждой ячейки сетки (i, j) рассчитывается в соответствии с формулой

$$\ln(\bar{C}_{ij}) = \frac{1}{\sum_{k=1}^N \tau_{ijk}} \sum_{k=1}^N \ln(C_k) \tau_{ijk}, \quad (1)$$

где i и j — широта и долгота ячейки; k — индекс траектории; N — общее число рассчитанных траекторий; C_k — концентрация, измеренная в момент прихода траектории k ; τ_{ijk} — время пребывания траектории k в ячейке (i, j) .

В данной работе региональное распределение источников черного углерода для острова Белый определялось путем соотношения обратных траекторий переноса воздушных масс за период наблюдений (август 2022 г.) к концентрации eBC в момент их прихода на станцию «Остров Белый». Рассчитан массив обратных траекторий переноса воздушных масс с шагом 1 ч и длительностью десять дней на высотах 250, 500 и 1000 м над уровнем земли (AGL) на основе модели HYSPLYT лаборатории «Air Resources Laboratory» [38] и архивных метеорологических данных GDAS (<http://www.arl.noaa.gov/ready>) с пространственным разрешением 1° широты и 1° долготы. Статистическая обработка данных и визуализация результатов проводились с использованием языка программирования R (ПО RStudio), пакетов OpenAir, Plotly, ggplot2, карты построены посредством ГИС-пакета QGIS.

Информация об очагах пожаров получена из базы данных Fire Information for Resource Management System (FIRMS), созданной системой NASA/GSFC Earth Science Data Information System (ESDIS) (<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map>) спутникового зондирования термоактивных точек на поверхности земли. Для наблюдения шлейфов пожаров использовались космоснимки NASA Earth Observing System Data and Information System WORLDVIEW (<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>). Расположение газовых факелов нефтегазодобывающего и перерабатывающего комплекса определялось по данным спутников MODIS и VIIRS о свечении объектов с температурой выше 1200°C , характерной для факельного сжигания газа (<https://viirs.skytruth.org/apps/heatmap/>).

Обсуждение результатов

Эпизоды загрязнений черным углеродом в августе 2022 г.

Непрерывные измерения черного углерода в 2019—2020 гг. на полярной аэрозольной станции МГУ «Остров Белый» показали сезонную изменчивость, характеризующуюся высокими значениями с декабря по апрель ($60 \pm 92 \text{ нг}/\text{м}^3$) и минимальными в июне-сентябре ($18 \pm 72 \text{ нг}/\text{м}^3$) [28]. В среднем летом концентрации были в 10 раз ниже, чем зимой, редко наблюдались эпизоды загрязнений. Перенос дымовых эмиссий лесных пожаров в Красноярском крае и Якутии был зарегистрирован 7 июля и 1 сентября 2020 г. По среднесуточным данным максимум черного углерода ($534 \text{ нг}/\text{м}^3$) наблюдался 1 сентября 2020 г., тогда он превысил арктический фон в 20 раз.

В июне и июле 2022 г. на станции «Остров Белый» наблюдались фоновые концентрации BC ($15,8 \pm 14,2 \text{ нг}/\text{м}^3$) за исключением периода с 3 по 8 июля, когда концентрация черного углерода превысила $150 \text{ нг}/\text{м}^3$. Временной ряд одночасовых усредненных концентраций черного углерода в августе 2022 г. представлен на рис. 4. Наблюдается большая варьированность концентраций eBC(880) от $0,5 \text{ нг}/\text{м}^3$ до максимального значения $851 \text{ нг}/\text{м}^3$ 12 августа в 09:00. Для сравнения с концентрациями черного углерода, обусловленными действием пожаров в 2020 г., были рассчитаны среднесуточные значения eBC(880) летом 2022 г. Максимальное значение $390 \text{ нг}/\text{м}^3$ было достигнуто 12 августа 2022 г., что оказалось ниже значения $534 \text{ нг}/\text{м}^3$, зарегистрированного при рекордных пожарных эмиссиях 1 сентября 2020 г. В краткосрочных измерительных кампаниях были получены данные эпизода загрязнений на гидрометеорологической обсерватории «Тикси» с 3 по 7 июля 2015 г. Тогда была зарегистрирована концентрация $130 \text{ нг}/\text{м}^3$, что могло быть результатом переноса шлейфов крупномасштабных пожаров в Западной Сибири [29]. Исследования на полярной станции «Ледовая

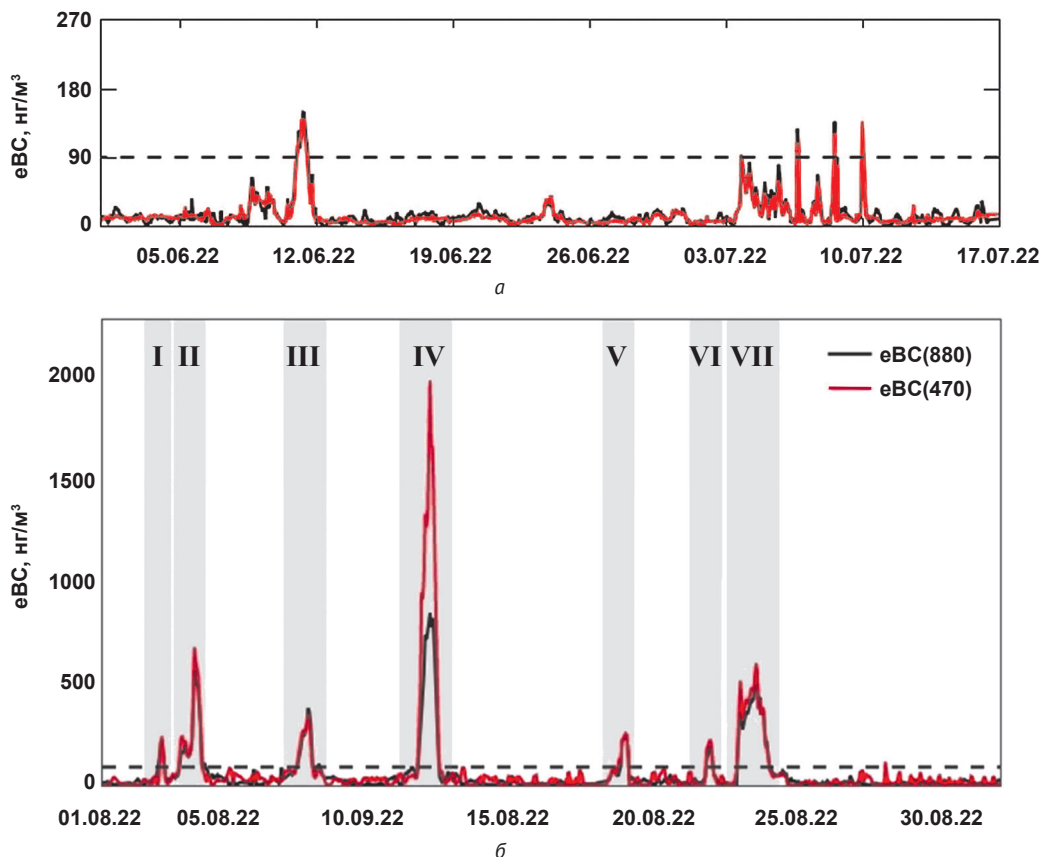


Рис. 4. Концентрации черного углерода на длинах волн 880 и 470 нм в июне и июле 2022 г. (а) и августе 2022 г. (б). Эпизоды, помеченные номерами, описаны в табл. 1. Пунктирной линией показано пороговое значение загрязнения 90 нг/м³
 Fig. 4. Black carbon concentrations at wavelengths of 880 and 470 nm in June and July 2022 (a), August 2022 (b). Episodes marked by numbers are described in Table 1. The dotted line indicates the pollution threshold of A pollution threshold of 90 ng/m³

база Мыс Баранова» показали максимальное влияние (250 нг/м³) в результате дальнего переноса воздушных масс из регионов пожаров в Евразии 5 августа 2016 г. [23].

Среднее значение eBC(880) в августе составило 68 ± 132 нг/м³. Определены семь эпизодов загрязнения, длительность которых и максимальные кон-

центрации представлены в табл. 1. Они чередуются с периодами фоновых концентраций на уровне 10 нг/м³.

Отметим, что в эпизодах загрязнений концентрация eBC(470), измеренная в ультрафиолетовом диапазоне излучения, превышала eBC(880) в инфракрасном диапазоне, т. е. наблюдалась положи-

Таблица 1. Эпизоды загрязнений черным углеродом на станции «Остров Белый» в августе 2022 г. Максимальная концентрация eBC_{max}(880) на длине волны 880 нм, разница DeltaC между eBC(470) и eBC(880)

Эпизод	Дата, время	eBC _{max} (880), нг/м ³	DeltaC, нг/м ³
I	02.08.2022, 23:00 — 03.08.2022, 23:00	227	16
II	04.08.2022, 0:00 — 04.08.2022, 12:00	567	116
III	07.08.2022, 17:00 — 08.08.2022, 11:00	384	9
IV	11.08.2022, 16:00 — 12.08.2022, 14:00	851	1150
V	18.08.2022, 21:00 — 19.08.2022, 03:00	238	18
VI	21.08.2022, 19:00 — 22.08.2022, 23:00	345	44
VII	23.08.2022, 0:00 — 24.08.2022, 01:00	577	27

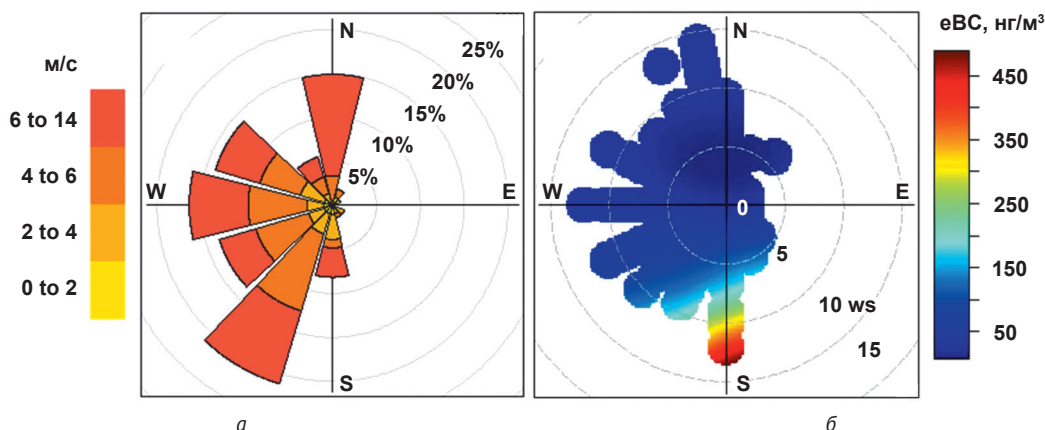


Рис. 5. Роза ветров (а) и распределение черного углерода eBC(880) в зависимости от направления и скорости ветра (б) в августе 2022 г.

Fig. 5. Wind rose (a) and distribution of black carbon eBC(880) depending on wind direction and speed (b) in August 2022

тельная разница в значениях DeltaC (см. табл. 1), что указывает на значительное влияние эмиссий лесных пожаров.

Роза ветров августа 2022 г. показывает, что примерно в 20% случаев наблюдались ветры юго-западного направления, частота встречаемости ветра в западном направлении составляет около 15%, восточные ветры практически не регистрировались, а частота встречаемости южных ветров составила 5—7% (рис. 5а).

Расчеты двумерной функции распределения концентрации eBC(880) в зависимости от скорости и направления ветра (рис. 5б) хорошо идентифицируют источники высоких концентраций черного углерода (более 450 нг/м³) в южном и юго-западном направлениях.

Именно в этих направлениях от острова Белый находятся полуостров Ямал и континент, где в августе 2022 г. были зарегистрированы крупнейшие лесные пожары на площади суммарно 665 265 га (<https://aviales.ru/>). При ветрах с севера и северо-запада, т. е. направления Северного Ледовитого океана, концентрации черного углерода были близки к фоновым — около 50 нг/м³.

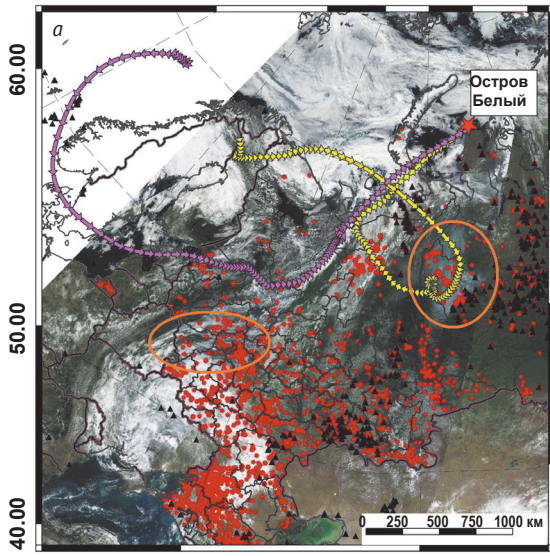
Перенос воздушных масс на острове Белый

Обратные траектории переноса воздушных масс для моментов наивысших концентраций семи эпизодов загрязнений показаны на рис. 6 и 7. Космические снимки позволяют увидеть шлейфы дымов пожаров в дни максимальных концентраций eBC, наблюдаемых на острове Белый. Во время эпизодов I—III воздушные массы приходили на остров Белый по северным территориям евразийского континента (рис. 6а—6в), огибая регионы ЯНАО и ХМАО над крупными очагами пожаров на границе ХМАО и ЯНАО. Во время эпизодов I—III воздушные массы проходили на острове Белый с северных территорий евразийского континента (рис. 6а—6в), огибая регионы ЯНАО и ХМАО над крупными очагами пожаров в Березовском и Советском районах, где согласно

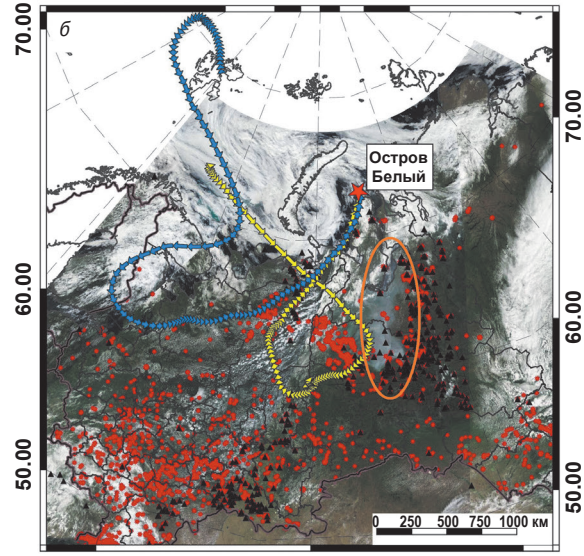
сводкам «Авиалесоохраны» на 28—29 июля 2022 г. зарегистрировано 18 и 23 лесных пожара соответственно, а площадь возгорания составила от 3028 до 4004 га (рис. 6а и 6б).

4 августа концентрация eBC(880) достигла наивысшего в этот период значения, равного 567 нг/м³, а разница в поглощении в ультрафиолетовом диапазоне по сравнению с инфракрасным DeltaC составила 116 нг/м³. Самые высокие концентрации черного углерода (851 нг/м³), превышающие порог загрязнений практически в 10 раз, а фон — в 85 раз, были зарегистрированы в эпизоде IV, когда воздушные массы проходили в широтном направлении вдоль побережья Северного Ледовитого океана через Кольский полуостров, Республику Коми и ЯНАО (см. рис. 7). В ЯНАО по данным на 15 августа было семь природных пожаров на общей площади 5540 га, самый масштабный из них с площадью возгорания более 800 га. Тогда значение DeltaC достигло 1150 нг/м³, продемонстрировав наивысшее значение индикатора влияния лесных пожаров на аэрозольный состав атмосферы.

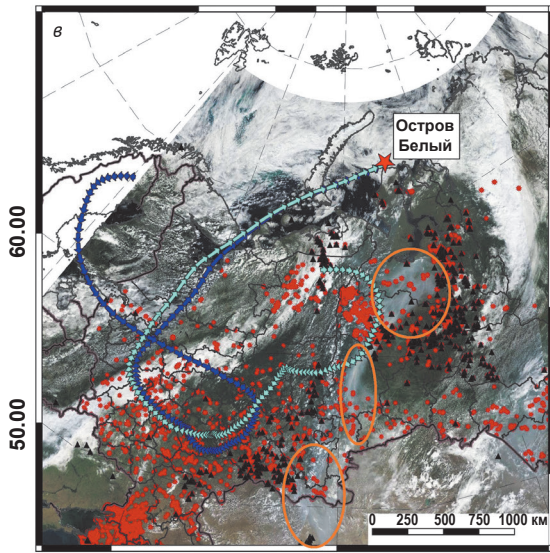
Воздушные массы, прибывающие на разных высотах в точку наблюдений, могут иметь отличающиеся траектории движения. Для эпизода IV рассмотрен перенос воздушных масс на высотах 250, 500 и 1000 м (см. рис. 7б). Траектории приходили с запада и круто разворачивались над территорией Ненецкого автономного округа к северо-востоку в направлении острова Белый, что было связано с распределением барических полей 12 августа 2022 г., когда над океаном сформировалась область низкого давления, а над континентом — высокого (см. рис. 3). Поток воздушных масс проходил над севером европейской России к полуострову Ямал, далее он резко поворачивал над областями пожаров (см. рис. 7а). Траектории на высоте 250 и 500 м делали дополнительный изгиб над районами пожаров в ЯНАО, тогда как траектория на высоте 1000 м проходила вдали от этого района (см. рис. 7б).



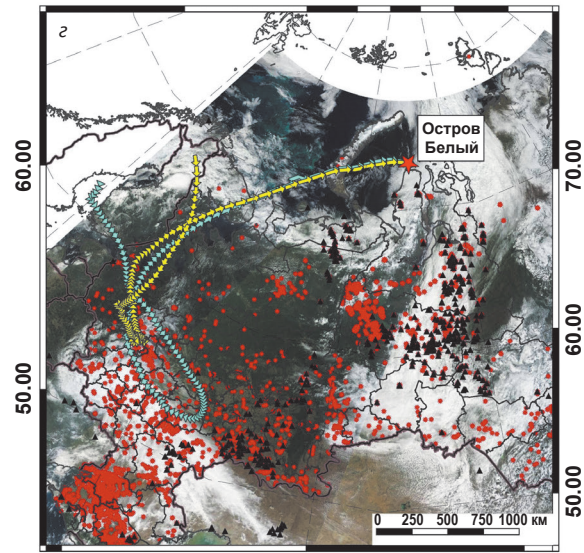
03.08.22 (01:00 UTC) 03.08.22 (02:00 UTC)



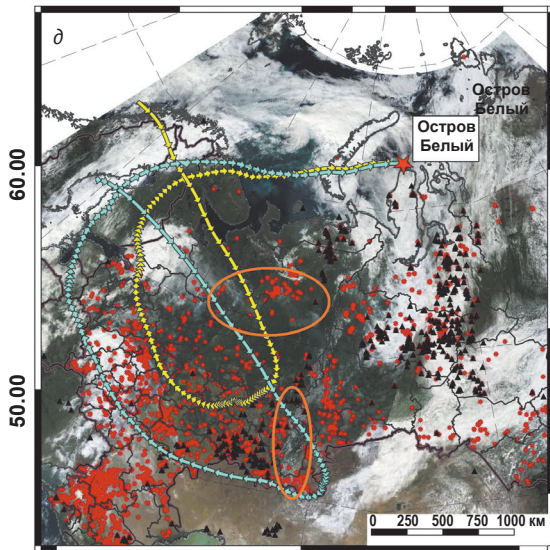
04.08.22 (04:00 UTC) 04.08.22 (04:00 UTC)



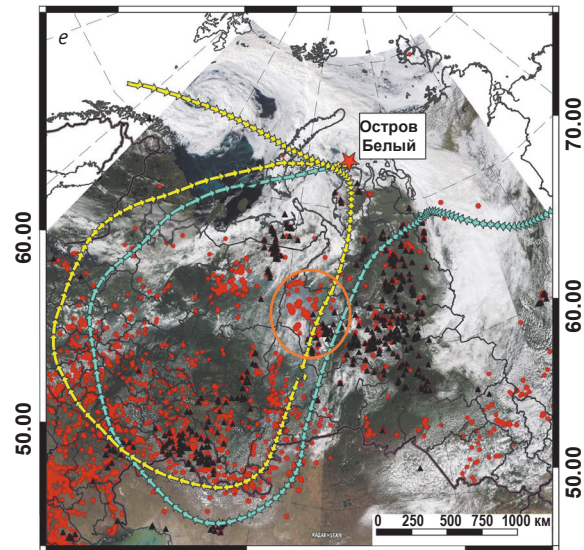
08.08.22 (02:00 UTC) 08.08.22 (03:00 UTC)



19.08.22 (00:00 UTC) 19.08.22 (01:00 UTC)



21.08.22 (20:00 UTC) 21.08.22 (21:00 UTC)



23.08.22 (12:00 UTC) 23.08.22 (16:00 UTC)

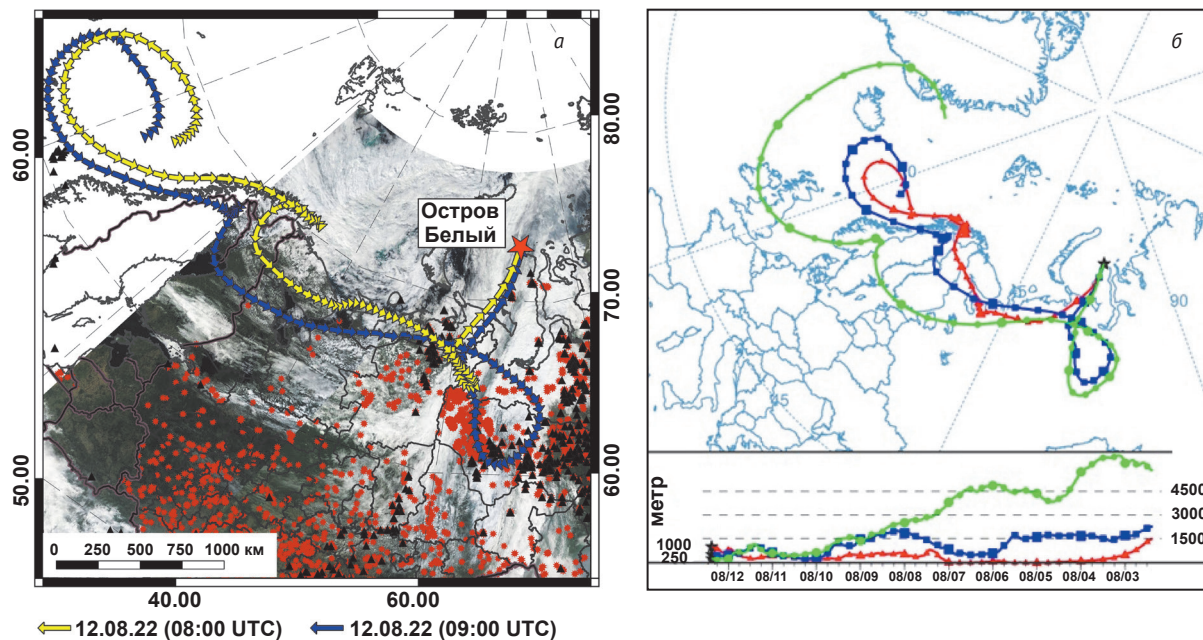


Рис. 7. Обратные траектории воздушных масс во время эпизода загрязнения IV на высоте 500 м AGL. Указаны время и дата прихода на станцию «Остров Белый». Составлено авторами на основе спутниковых снимков MODIS Corrected Reflectance imagery <https://worldview.earthdata.nasa.gov> (a).

Обратные траектории в момент наблюдений 12 сентября 2022 г. в 9:00 на высотах 250 (зеленая), 500 (синяя) и 1000 м (красная) AGL. Составлено авторами на основе Arlmap HYSPLIT map background file https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT_util.php (б)

Fig. 7. Air mass back trajectories during pollution episode IV at 500 m AGL. The time and date of arrival at the station “Bely Island” are indicated. Based on satellite images MODIS Corrected Reflectance imagery <https://worldview.earthdata.nasa.gov> (a).

Back trajectories at the time of observations on September 12, 2022 at 9:00 at altitudes of 250 (green), 500 (blue) and 1000 m (red) AGL. Based on Arlmap HYSPLIT map background file https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT_util.php (б)

Во второй половине августа перенос воздушных масс значительно изменился. Во время эпизодов загрязнения V—VII он проходил в основном над европейской Россией, включая степные районы Оренбургской, Саратовской и Челябинской областей (рис. 6г—6е). Во время прохождения воздушных масс над Мещерским и Окским биосферными заповедниками (Рязанская область) наблюдались крупномасштабные лесные пожары, охватившие

Рис. 6. Обратные траектории воздушных масс на высоте 500 м над уровнем моря во время эпизодов I (а), II (б), III (в), V (з), VI (д) и VII (е); указаны время и дата прихода на станцию «Остров Белый». Красными точками показаны пожары за десять дней прохождения воздушными массами территорий до острова Белый. Черными треугольниками показано расположение газовых факелов нефтяных и газовых месторождений (по данным <https://skytruth.org/>). Космоснимки соответствуют дате максимальной концентрации в каждом эпизоде, кругами указаны области дымовых шлейфов. Составлено авторами на основе спутниковых снимков MODIS Corrected Reflectance imagery <https://worldview.earthdata.nasa.gov>

Fig. 6. Air mass back trajectories at a height of 500 m AGL during episodes I (a), II (б), III (в), V (з), VI (д) and VII (е); the time and date of arrival at the station “Island Bely”. Red dots show fires during ten days of air masses passage over the territories to Bely Island. Black triangles show the location of gas flares of oil and gas fields (according to <https://skytruth.org/>). Space images correspond to the date of maximum concentration in each episode; circles indicate areas of smoke plumes. Based on MODIS Corrected Reflectance imagery <https://worldview.earthdata.nasa.gov>

площади до 25 000 га. Очаги пожаров также были зарегистрированы вдоль пути следования над северными районами Казахстана. К острову Белый воздушные массы прибывали из центральных районов страны, Республики Карелия и Мурманской области. 23 августа концентрация $eBC(880)$ достигла максимума, равного 511 нм/м^3 , а значение ΔaC составило 27 нг/м^3 .

Самый длительный эпизод загрязнения VII случился с 23 по 24 августа, когда наблюдался перенос воздушных масс через территории Западной Сибири и Восточно-Европейской равнины (см. рис. 6е), более детально — с севера Красноярского края на юго-запад по направлению к северным территориям Казахстана и далее к Волгоградской и Саратовской областям, на северо-восток к острову Белый.

Распределение источников черного углерода для острова Белый определялось путем расчета концентраций $eBC(880)$ для каждой ячейки пространственной сетки по формуле (1) за период наблюдений (август 2022 г.). Определены области, характеризующиеся концентрациями eBC выше порогового уровня загрязнений 90 нг/м^3 , которые представляют регионы источников эмиссии черного углерода разной интенсивности (рис. 8). Источники самых высоких концентраций черного углерода на северных территориях России определены в ЯНАО и ХМАО, Ненецком автономном округе, в республиках Коми и Карелия, Архангельской и Мурманской

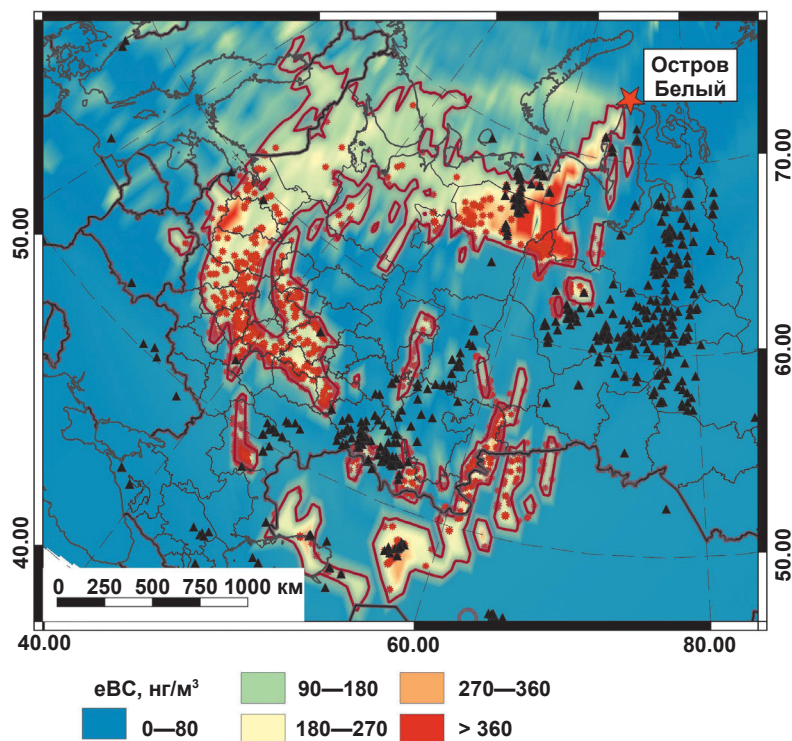


Рис. 8. Региональное распределение источников черного углерода для острова Белый в августе 2022 г. Зоны, характеризующиеся концентрациями eBC выше порогового уровня загрязнений, околнурены красной линией. Очаги пожаров в этих зонах показаны точками. Треугольниками помечены факелы нефтегазовых месторождений. Составлено авторами на картографической основе ESRI Standard map https://server.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World_Street_Map
 Fig. 8. Regional distribution of black carbon sources for Bely Island in August 2022. Zones characterized by eBC concentrations above the threshold level of pollution are outlined by the red line. Dots show the fire centers in these zones. Triangles mark flares of oil and gas fields. Based on the ESRI Standard map https://server.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World_Street_Map

областях. В центральных регионах европейской России выделяются Рязанская, Владимирская, Пензенская, Орловская и Смоленская области, республики Мордовия, Марий Эл и Татарстан. Самые удаленные регионы источников обнаружены на юге Урала (в Оренбургской и Челябинской областях) и в северных районах Казахстана.

Для определения регионов пожарных эмиссий на рис. 8 нанесены спутниковые данные о расположении термоактивных точек (пожаров) внутри зон, определяющих концентрации eBC выше 90 нг/м³. Хорошо видны регионы высоких концентраций черного углерода и охваченные обширными пожарами. Дополнительно на карту рис. 8 нанесены данные о свечении объектов с температурой выше 1200°C, связанные с факелами нефтегазовых месторождений. Как видно, регионы источников арктических загрязнений черного углерода в Арктике и месторасположение крупнейших объектов топливно-энергетического комплекса не совпадают, еще раз указывая на доминирующую роль пожаров в августе 2022 г.

Заключение

Непрерывные измерения поглощающей способности аэрозолей в широком диапазоне солнечного излучения, выполненные на инструментальном комплексе полярной станции «Остров Белый», позволили определить уровень аэрозольного загрязнения на острове Белый летом 2022 г. В августе 2022 г. максимальные концентрации черного углерода в инфракрасном диапазоне достигали 851 нг/м³, что в 85 раз превысило фоновые концентрации для арктического региона. Траекторный анализ показал, что воздушные массы перенесли на остров Белый шлейфы пожаров, охвативших в результате рекордных температурных аномалий и засухливой погоды значительные территории европейской России и Западной Сибири. Вклад пожарных эмиссий в состав аэрозолей арктического региона подтвердился по повышенному поглощению в ультрафиолетовом диапазоне солнечного излучения в максимуме, превысившем черный углерод в инфракрасном диапазоне на 1150 нг/м³. Моделирование методом отнесения траекторий переноса воздушных масс дало оценку вклада регионов ЯНАО и ХМАО, европейской России, южного Урала и северных районов Казахстана в загрязнение атмосферы западно-сибирского сектора российской Арктики.

Работа выполнена по программе развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды» при поддержке гранта РФФИ № 22-17-00-102. Методология инфраструктуры аэрозольного комплекса на полярной станции «Остров Белый» развита в рамках проекта № 075-15-2021-938.

Литература/References

1. Попова В. Современные изменения климата на севере Евразии как проявление вариаций крупномасштабной атмосферной циркуляции // *Фундамент. и прикладная климатология*. — 2018. — Т. 1. — С. 84—111. — DOI: 10.21513/2410-8758-2018-1-84-111.
 Popova V. Modern Climate Changes in the North of Eurasia as a Manifestation of Large-Scale Atmospheric

- Circulation Variations. *Fundamental and applied climatology*, 2018, vol. 1, pp. 84—111. (In Russian).
2. Мохов И. Особенности формирования летней жары 2010 г. на европейской территории России в контексте общих изменений климата и его аномалий // *Изв. Рос. акад. наук. Физика атмосферы и океана*. — 2011. — Т. 47, № 6. — С. 709—716.
 - Mohov I. Specific features of the summer heat formation in the European territory of Russia in the context of general climate. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2011, vol. 47, no. 6, pp. 653—660.
 3. Lavoué D., Liousse C., Cachier H., Stocks B. J., Goldammer J. G. Modeling of carbonaceous particles emitted by boreal and temperate wildfires at northern latitudes. *J. of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, vol. 105, pp. 26871—26890.
 4. Conard S. G., Ivanova G. A. Wildfire in Russian boreal forests—Potential impacts of fire regime characteristics on emissions and global carbon balance estimates. *Environmental Pollution*, 1997, vol. 98, pp. 305—313. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(97\)00140-1](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(97)00140-1).
 5. Diapouli E., Popovicheva O., Kistler M., Vratolis S., Persiantseva N., Timofeev M., Kasper-Giebl A., Eleftheriadis K. Physicochemical characterization of aged biomass burning aerosol after long-range transport to Greece from large scale wildfires in Russia and surrounding regions, Summer 2010. *Atmospheric environment*, 2014, vol. 96, pp. 393—404. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.03.026>.
 6. Popovicheva O., Molozhnikova E., Nasonov S., Potemkin V., Penner I., Klemasheva M., Marinaite I., Golobokov L., Vratolis S., Eleftheriadis K. Industrial and wildfire aerosol pollution over world heritage Lake Baikal. *J. of environmental sciences*, 2021, vol. 107, pp. 49—64. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.01.011>.
 7. Johnson M. S., Strawbridge K., Knowland K. E., Keller C., Travis M. Long-range transport of Siberian biomass burning emissions to North America during FIREX-AQ. *Atmospheric Environment*, 2021, vol. 252, p. 118241. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2021.118241.
 8. Agarwal S., Aggarwal S. G., Okuzawa K., Kawamura K. Size distributions of dicarboxylic acids, ketoacids, α -dicarbonyls, sugars, WSOC, OC, EC and inorganic ions in atmospheric particles over Northern Japan: implication for long-range transport of Siberian biomass burning and East Asian polluted aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, vol. 10, pp. 5839—5858. DOI: 10.5194/acp-10-5839-2010.
 9. Воронова О., Зима А., Кладов В., Черепанова Е. Аномальные пожары на территории Сибири летом 2019 г. // *Исследование Земли из космоса*. — 2020. — С. 70—82. — DOI: 10.31857/S0205961420010121. Voronova O., Zima A., KladoV V., Cherepanova E. Anomalous fires in Siberia in the summer of 2019. *J. of Remote Sensing*, 2020, no. 1, pp. 70—82. (In Russian).
 10. Kozlov V. S., Yausheva E. P., Terpugova S. A., Panchenko M. V., Chernov D. G., Shmargunov V. P. Optical-microphysical properties of smoke haze from Siberian forest fires in summer 2012. *Intern. J. of Remote Sensing*, 2014, vol. 35, pp. 5722—5741. DOI: 10.1080/01431161.2014.945010.
 11. Reid J., Koppmann R., Eck T., Eleuterio D. A review of biomass burning emissions. Pt. 2. Intensive physical properties of biomass burning particles, 2005, vol. 5, pp. 799—825.
 12. Popovicheva O. B., Kozlov V. S., Engling G., Diapouli E., Persiantseva N. M., Timofeev M., Fan T.-S., Saraga D., Eleftheriadis K. Small-scale study of Siberian biomass burning: I. Smoke microstructure. *Aerosol Air Qual. Res.*, 2015, vol. 15, pp. 117—128.
 13. Поповичева О. Б., Козлов В. С., Рахимов Р. Ф., Шмаргунов В. П., Куреева Е. Д., Персианцева Н. М., Тимофеев М. А., Engling G., Eleftheriadis K., Diapouli L., Панченко М. В., Zimmermann R., Schnelle-Kreis J. Оптико-микрофизические и физико-химические характеристики дымов горения сибирских биомасс: Эксперименты в аэрозольной камере // *Оптика атмосферы и океана*. — 2016. — Т. 29. — С. 323—331. Popovicheva O. B., Kozlov V. S., Rakhimov R. F., Shmargunov V. P., Kireeva E. D., Persiantseva N. M., Timofeev M. A., Engling G., Eleftheriadis K., Diapouli L., Panchenko M. V., Zimmermann R., Schnelle-Kreis J. Optical-microphysical and physical-chemical characteristics of Siberian biomass burning: small-scale fires in an aerosol chamber. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2016, vol. 29, pp. 323—331. (In Russian).
 14. Самсонов Ю., Попов С., Беленко О., Чанкина О. Химический состав и дисперсные характеристики дымовой аэрозольной эмиссии от пожаров в бореальных лесах Сибири // *Оптика атмосферы и океана*. — 2008. — Т. 21. — С. 523—531. Samsonov Yu., Popov S., Belenko O., Chankina O. Chemical composition and disperse characteristics of smoke aerosol emission from fires in the boreal forests of Siberia. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2008, vol. 21, pp. 523—531. (In Russian).
 15. Kozlov V. S., Panchenko M. V., Shmargunov V. P., Chernov D. G., Yausheva E. P., Pol'kin V. V., Terpugova S. A. Long-term investigations of the spatiotemporal variability of black carbon and aerosol concentrations in the troposphere of West Siberia and Russian Subarctic. *Chemistry for Sustainable Development*, 2016, vol. 24, pp. 423—440.
 16. Quinn P., Stohl A., Arneth A., Berntsen T., Burkhardt J., Christensen J., Flanner M., Kupiainen K., Lihavainen H., Shepherd M. et al. The impact of black carbon on Arctic climate. AMAP Technical Report, 2011, vol. 4.
 17. Moschos V., Schmale J., Aas W., Becagli S., Calzolari G., Eleftheriadis K., Moffett C. E., Schnelle-Kreis Jü., Severi M., Sharma S., Skov H., Vestenius M., Zhang Wendy, Hakola H., Hellén H., Huang Lin, Jaffrezo J.-L., Massling A., Nøjgaard J. K., Petäjä T., Popovicheva O., Sheesley R. J., Traversi R., Yttri K. E., Prévôt A. S. H., Baltensperger U., Haddad I. El. Elucidating the present-day chemical composition, seasonality and source regions of climate-relevant aerosols across the Arctic land surface. *Environmental Research Letters*, 2022, vol. 17, p. 034032.

18. Wang Q., Jacob D. J., Fisher J. A., Mao J., Leibensperger E. M., Carouge C. C., Le Sager P., Kond Y., Jimenez J. L., Cubison M. J. et al. Sources of carbonaceous aerosols and deposited black carbon in the Arctic in winter-spring: implications for radiative forcing. *Atmos. Chem. Phys.*, 2011, vol. 1, pp. 12453—12473. DOI:10.5194/acp-11-12453-2011.
19. Ren L., Yang Y., Wang H., Zhang R., Wang P., Liao H. Source attribution of Arctic black carbon and sulfate aerosols and associated Arctic surface warming during 1980—2018. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, vol. 20, pp. 9067—9085.
20. Paris J.-D., Stohl A., Nédélec P., Arshinov M. Y., Panchenko M., Shmargunov V., Law K. S., Belan B., Ciais P. Wildfire smoke in the Siberian Arctic in summer: source characterization and plume evolution from airborne measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, vol. 9, pp. 9315—9327.
21. Warneke C., Froyd K., Brioude J., Bahreini R., Brock C., Cozic J., De Gouw J., Fahey D., Ferrare R., Holloway J. An important contribution to springtime Arctic aerosol from biomass burning in Russia. *Geophysical Research Letters*, 2010, vol. 37.
22. Schmal J., Sharma S., Decesari S., Pernov J., Massling A., Hansson H.-C., Von Salzen K., Skov H., Andrews E., Quinn P. K. Pan-Arctic seasonal cycles and long-term trends of aerosol properties from 10 observatories. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2022, vol. 22, pp. 3067—3096.
23. Manousakas M., Popovicheva O., Evangelidou N., Diapouli E., Sitnikov N., Shonija N., Eleftheriadis K. Aerosol carbonaceous, elemental and ionic composition variability and origin at the Siberian High Arctic, Cape Baranova. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2020, vol. 72, pp. 1—14.
24. 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. Результаты измерений физико-химических характеристик атмосферного аэрозоля на научно-исследовательском стационаре «Ледовая база «Мыс Баранова» в 2018 г. // *Оптика атмосферы и океана*. — 2019. — Т. 32. — С. 421.
- Sakerin S. M., Golobokova L. P., Kabanov D. M., Kalashnikov D. A., Kozlov V. S., Kruglinski I. A., Makarov V. I., Makshtas A. P., Popova S. A., Radionov V. F. The results of measurements of the physicochemical characteristics of atmospheric aerosol at the research station “Ice base” Cape Baranov. *Atmospheric Ocean Optics*, 2019, vol. 32, pp. 421. (In Russian).
25. Yue S., Zhu J., Chen S., Xie Q., Li W., Li L., Ren H., Su S., Li P., Ma H. Brown carbon from biomass burning imposes strong circum-Arctic warming. *One Earth*, 2022, vol. 5, pp. 293—304.
26. Romanenkov V., Rukhovich D., Koroleva P., McCarty J. L. Estimating black carbon emissions from agricultural burning. Novel measurement and assessment tools for monitoring and Management of Land and Water Resources in agricultural landscapes of Central Asia. [S. l.], Springer, 2014, pp. 347—364.
27. Виноградова А. А., Смирнов Н. С., Коротков Н. Аномальные пожары 2010 и 2012 гг. на территории России и поступление черного углерода в Арктику // *Оптика атмосферы и океана*. — 2016. — Т. 29. — С. 482—487.
- Vinogradova A. A., Smirnov N. S., Korotkov N. Anomalous fires of 2010 and 2012 in Russia and the supply of black carbon to the Arctic. *Atmospheric Ocean Optics*, 2016, vol. 29, pp. 482—487.
28. Popovicheva O. B., Evangelidou N., Kobelev V. O., Chichaeva M. A., Eleftheriadis K., Gregorič A., Kasimov N. S. Siberian Arctic black carbon: gas flaring and wildfire impact. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2022, vol. 22, pp. 5983—6000.
29. 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. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 655, pp. 924—938.
30. Drinovec L., Močnik G., Zotter P., Prévôt A., Ruckstuhl C., Coz E., Rupakheti M., Sciare J., Müller T., Wiedensohler A. The “dual-spot” Aethalometer: an improved measurement of aerosol black carbon with real-time loading compensation. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, vol. 8, pp. 1965—1979.
31. Zhang Y., Schnelle-Kreis J., Abbaszade G., Zimmermann R., Zotter P., Shen R. R., Schaefer K., Shao L., Prévôt A.S., Szidat S. Source apportionment of elemental carbon in Beijing, China: Insights from radiocarbon and organic marker measurements. *Environ. Sci. Technol.*, 2015, vol. 49, pp. 8408—8415.
32. Allen G. A., Miller P. J., Rector L. J., Brauer M., Su J. G. Characterization of valley winter woodsmoke concentrations in Northern NY using highly time-resolved measurements. *Aerosol and Air Quality Research*, 2011, vol. 11, pp. 519—530.
33. Wang Y., Hopke P. K., Rattigan O. V., Xia X., Chalupa D. C., Utell M. J. Characterization of residential wood combustion particles using the two-wavelength aethalometer. *Environmental science & technology*, 2011, vol. 45, pp. 7387—7393.
34. Eleftheriadis K., Nyeki S., Psomiadou C., Colbeck I. Background aerosol properties in the European arctic. *Water, Air and Soil Pollution: Focus*, 2004, vol. 4, pp. 23—30.
35. Uria-Tellaetxe I., Carslaw D. C. Conditional bivariate probability function for source identification. *Environmental modelling & software*, 2014, vol. 59, pp. 1—9.
36. Popovicheva O., Chichaeva M., Kobelev V., Sinitskiy A., Hansen A. Black Carbon in urban emissions on the Polar Circle. *Proceedings of the 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics*. 2020, pp. 1211—1217.
37. Shukurov K., Postilyakov O., Borovski A., Shukurova L., Gruzdev A., Elokhov A., Savinykh V., Mokhov I., Semenov V., Chkhetiani O. Study of transport of atmo-

spheric admixtures and temperature anomalies using trajectory methods at the AM Obukhov Institute of Atmospheric Physics. Proceedings of the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. [S. l.], 2019, p. 012048.

38. Stein A., Draxler R., Rolph G., Stunder B., Cohen M., Ngan F. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. B. Am. Meteorol. Soc., 2015, vol. 96, pp. 2059—2077.

Информация об авторах

Поповичева Ольга Борисовна, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2), e-mail: olga.popovicheva@gmail.com.

Чичаева Марина Александровна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, географический факультет, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1), e-mail: machichaeva@gmail.com.

Ковач Роман Геннадьевич, научный сотрудник, географический факультет, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д.1), e-mail: rkovach@yandex.ru.

Касимов Николай Сергеевич, доктор географических наук, профессор, академик РАН, заведующий кафедрой геохимии ландшафтов и географии почв, географический факультет, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1), e-mail: nskasimov@mail.ru.

Кобелев Василий Олегович, Московское отделение Русского географического общества (109012, Россия, Москва, Новая площадь, д. 10, стр. 2, оф. 304), e-mail: vasily.kobelev@gmail.com.

Синицкий Антон Иванович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики» (629008, Россия, Тюменская область, Ямало-Ненецкий автономный округ, Салехард, ул. Республики, д. 20, оф. 203), e-mail: geolosoph@gmail.com.

Библиографическое описание данной статьи

Поповичева О. Б., Чичаева М. А., Ковач Р. Г. и др. Лесные пожары как источник черного углерода в Арктике летом 2022 г. // Арктика: экология и экономика. — 2023. — Т. 13, № 2. — С. 257—270. — DOI: 10.25283/2223-4594-2023-2-257-270.

WILDFIRES AS A SOURCE OF BLACK CARBON IN THE ARCTIC IN SUMMER 2022

Popovicheva, O. B., Chichaeva, M. A., Kovach, R. G., Kasimov, N. S.
Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russian Federation)

Kobelev, V. O.
Moscow department of Russian geography society (Moscow, Russian Federation)

Sinitskiy, A. I.
Scientific Center for the Study of the Arctic (Salehard, Russian Federation)

The article was received on October 28, 2022

Abstract

The assessment of aerosol pollution of the atmosphere in the high-latitude regions of the Arctic is among the most important environmental and climate problems. In the summer of 2022, due to abnormal temperatures and a lack of precipitation, the wildfire areas in the Western Siberia and European part of the Russian Federation reached record levels. At the polar aerosol station of the Moscow State University “Island Bely” (the Kara

Sea), continuous aethalometric measurements of the short-lived climatic tracer namely black carbon are carried out. In August 2022, seven episodes of pollution were recorded, significantly exceeding the background typical for the Arctic summer. An analysis of the aerosol absorption capacity in a wide range of solar radiation revealed a significant effect of wildfire plumes on the aerosol composition of the Arctic atmosphere. The distribution of high concentrations of black carbon depending on the wind direction and speed pointed to the southern direction, Yamal Peninsula, as a source of high pollution. Regional distribution of black carbon sources calculated by the method of assigning air mass transfer trajectories to measured concentrations on Bely Island identifies the regions of the Western Siberia, the northern and central regions of the European part of Russia, the steppe regions of the East European Plain, and the Southern Urals. Wildfires from identified source regions impacted significantly the composition of the climatically active aerosol component of the atmosphere.

Keywords: *atmospheric pollution, black carbon, wildfires, air mass transfer.*

The work was carried out according the Development Program of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of the Lomonosov Moscow State University “The Future of the Planet and Global Environmental Changes” and supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-17-00-102. The infrastructure methodology for the aerosol complex at the “Island Bely” polar station was developed within the project No. 075-15-2021-938 framework.

Information about the authors

Popovicheva, Olga Borisovna, PhD of Physical and Mathematical Sciences, Leading Scientist, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University (bldg. 2, 1, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119991), e-mail: olga.popovicheva@gmail.com.

Chichaeva, Marina Alexandrovna, PhD of Physical and Mathematical Sciences, Researcher, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University (1, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119991), e-mail: machichaeva@gmail.com.

Kovach, Roman Gennadievich, Researcher, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University (office 304, bldg. 2, 10, Novaya Ploshad, Moscow, Russia, 109012), e-mail: rkovach@yandex.ru.

Kasimov, Nikolai Sergeevich, Doctor of Geography, Professor, academician RAS, Head of the Chair of landscape geochemistry and soil geography, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University (1, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119991), e-mail: nskasimov@mail.ru.

Kobelev, Vasilij Olegovich, Moscow Branch of the Russian Geographical Society (office 304, bldg. 2, 10, Novaya Ploshad, Moscow, Russia, 109012), e-mail: vasily.kobelev@gmail.com.

Sinitskiy, Anton Ivanovich, PhD of Geology and Mineralogy, Senior Researcher, SAI “Scientific Center for the Study of the Arctic” (office 203, 20, Respubliki str., Salekhard, Yamalo-Nenets Autonomous Area, Tyumenskaya obl., Russia, 629008), e-mail: geolosoph@gmail.com.

Bibliographic description of the article

Popovicheva, O. B., Chichaeva, M. A., Kovach, R. G., Kasimov, N. S., Kobelev, V. O., Sinitskiy, A. I. Wildfires as a source of black carbon in the Arctic in August 2022. *Arctic: Ecology and Economy*, 2023, vol. 13, no. 2, pp. 257—270. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-2-257-270. (In Russian).

© Popovicheva O. B., Chichaeva M. A., Kovach R. G., Kasimov N. S., Kobelev V. O., Sinitskiy A. I., 2023