

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.556

Региональные источники загрязнения атмосферы Арктики черным углеродом по данным измерений на острове Белый

О.Б. Поповичева^{✉1}, М.А. Чичаева², В.О. Кобелев³, Н.С. Касимов^{2*}

¹НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобелъцына, Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

119991, г. Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2

²Географический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

³Московское городское отделение Русского географического общества
109012, г. Москва, Новая площадь, 10, стр. 2

Поступила в редакцию 3.08.2022 г.;

после доработки 25.08.2022 г.;

принята к печати 25.10.2022 г.

В настоящее время вклад источников аэрозолей в загрязнение Российского сектора Арктики сильно недооценен. В августе 2019 г. на о-ве Белом (Карское море), находящемся на пути переноса воздушных масс из промышленных районов Западной Сибири в Арктику, установлена новая полярная аэрозольная станция МГУ. Непрерывные аэталометрические измерения короткоживущего климатического трассера — черного углерода (с августа по декабрь 2019 г. и с января по ноябрь 2020 г.) показали его сезонную изменчивость с высокими значениями в декабре — апреле ($60 \div 92$ нг/м³) и низкими в июне — сентябре ($18 \div 72$ нг/м³). Идентифицированы периоды загрязнений. Рассчитано региональное распределение источников сжигания различного природного топлива и биомасс методом отнесения траекторий переноса воздушных масс к измеряемым концентрациям черного углерода. Выяснено, что влияние факельного сжигания газа нефтегазодобывающих регионов Западной Сибири, Поволжья, Урала и Республики Коми наиболее значительно в холодный период года, а дымовых эмиссий пожаров — в теплый. Индикатор влияния сжигания биомасс, определенный по разнице измерений в широком спектре длин волн, указал на преобладающее влияние сжигания древесины в жилом секторе в холодный период и сельскохозяйственных и лесных пожаров в теплый.

Ключевые слова: Арктика, черный углерод, эмиссии, сжигание природного топлива, лесные пожары, сезонные тренды; Arctic, black carbon, emissions, fossil fuel combustion, wildfires, seasonal trends.

Введение

Климатические изменения, вызванные аэрозольным загрязнением атмосферы, являются серьезной проблемой во всем мире. Вследствие индустриализации и роста численности населения увеличиваются выбросы в атмосферу аэрозольных веществ и частота крупномасштабных лесных пожаров. Арктический регион особенно подвержен эмиссиям источников сжигания природных топлив и биомасс. В зимне-весенний период из-за комбинации интенсивного дальнего переноса антропогенных эмиссий с низких широт и температурной инверсии наблюдается Арктическая дымка [1]. С увеличением солнечной активности весной устойчивость атмосферы умень-

шается, концентрация аэрозолей падает, влияние локальных источников прибрежных районов Арктики становится более значительными по сравнению с зимой.

Черный углерод (BC, black carbon) в составе продуктов сжигания хорошо поглощает солнечное излучение, является короткоживущей климатически значимой составляющей, оказывает значительное воздействие на климат Арктики [2]. Совместное влияние BC и охлаждающих атмосферу сульфатов вызывает увеличение температуры поверхности Арктики на +0,29 К и составляет ~20% от всех факторов потепления в Арктике с начала 1980-х гг. [3]. Накопление BC в нижней тропосфере усиливает энергетический обмен между облаками и снежным покровом [4]. Осаждение BC на снег приводит к уменьшению альбедо подстилающей поверхности и ускорению таяния снега и льда [5].

Высокомолекулярный органический углерод, называемый коричневым углеродом (BrC), поглощает солнечное излучение в ультрафиолетовом диапа-

* Ольга Борисовна Поповичева (olga.popovicheva@gmail.com); Марина Александровна Чичаева (machichaeva@gmail.com); Василий Олегович Кобелев (vasily.kobelev@gmail.com); Николай Сергеевич Касимов (nskasimov@mail.ru).

зоне, демонстрируя существенные различия между дымками при сжигании древесины и эмиссиями транспорта [6, 7]. ВгС, накапливающийся в арктических аэрозолях в результате переноса дымовых эмиссий пожаров, вносит значительный вклад в нагрев атмосферы региона с радиационным форсингом ~30% по отношению к ВС [8].

До 62% ВС в атмосферу высокоширотной Арктики (севернее 66° с.ш.) поступает с российских территорий [9]. Данные самолетных измерений подтверждают, что тропосферный ВС над побережьем российских арктических морей сильно изменчив в пространстве и времени и среди его источников преобладают антропогенные [10]. Несмотря на сокращение антропогенных выбросов за последние десятилетия [11] наблюдения сезонных циклов ВС на 10 полярных обсерваториях, включая ГМО Тикси (побережье моря Лаптевых, восточно-сибирский сектор Арктики), продемонстрировали ежегодное повторяющееся зимой явление – Арктическую дымку. В весенне-летние сезоны в прибрежных лесных районах Арктики регистрируются шлейфы природных пожаров [12]. Перенос ВС шлейфами пожаров летом был зарегистрирован в измерениях физико-химических характеристик атмосферных аэрозолей на полярной станции «Ледовая база “Мыс Баранова”» (арх. Северная Земля, восточно-сибирский сектор Арктики) [13, 14]. Сельскохозяйственные пожары в европейской части РФ и на юге Сибири – значимый источник эмиссий и загрязнений Арктики [15].

Из-за больших объемов выбросов и близости к исследуемому региону факельное сжигание газа на нефтегазовых промыслах [16] обуславливает до 42% среднегодовых концентраций ВС в Арктике [17]. Крупнейшие нефтегазодобывающие регионы Западной Сибири и северо-востока европейской части России, расположенные на пути переноса воздушных масс в Арктику, вносят непропорционально большой вклад в загрязнение арктической тропосферы [18, 19]. Вынос шлейфов загрязнений из этих районов в моря Северного Ледовитого океана приводит к возрастанию концентраций ВС до 400 нг/м³ в сравнении с уровнем в несколько нг/м³ при обратном направлении ветра [20]. Однако достоверность оценок вклада эмиссий факельного сжигания газа на действующих в настоящее время в Европейском и Канадском секторах Арктики полярных станциях низка из-за их значительной удаленности от промышленных источников [17], а существующие модели воспроизводят концентрации ВС в Арктическом регионе с большой неопределенностью [21].

Высокие концентрации ВС, определенные на ГМО Тикси, обусловлены эмиссиями жилого сектора и дальним переносом из промышленных районов преимущественно в зимне-весенний период, более низкие концентрации летом – результат горения биомасс во время природных пожаров [22]. Данные радиоуглеродного анализа на ст. ГМО Тикси продемонстрировали преобладающее влияние сжигания природных топлив по сравнению со сжи-

ганием биомасс – на 32±16% [23]. Ранее было показано [24], что транспортная дисперсионная модель частиц с базой данных антропогенных эмиссий и эмиссий сжигания биомассы хорошо определяет вклад источников ВС в Европейском секторе Арктики. Однако для ГМО Тикси с помощью этой модели был получен непредсказуемо малый вклад ~6% эмиссий факельного сжигания газа, что объясняется значительной неопределенностью в данных о пространственном распределении источников ВС по территории Сибири, отсутствием инвентаризации выбросов и большой удаленностью станции от нефтегазодобывающих регионов.

Для оценки климатических последствий эмиссий углеродосодержащих аэрозолей необходимы комплексные измерения свойств арктических аэрозолей, включающих поглощающую способность в широком спектре солнечного излучения. С целью проведения длительных комплексных наблюдений за составом арктической атмосферы и для оценки влияния эмиссий нефтегазового сектора в 2019 г. на о-ве Белый, расположенном в Карском море (ЯНАО, западно-сибирский сектор Арктики), была установлена новая исследовательская полярная аэрозольная станция МГУ «Остров Белый» (<https://reexhq.home.blog/2019/12/11/new-research-aerosol-stations-in-the-russian-arctic>). Предварительно были проведены трехмесячные непрерывные измерения массовых концентраций ВС на аэрозольном комплексе вблизи г. Салехарда [25]. Месторасположение станции на севере ЯНАО на пути выноса крупномасштабных эмиссий из промышленных регионов Западной Сибири, густонаселенных и промышленных районов Евразии в Арктику предоставляет уникальную возможность для изучения аэрозольно-загрязнения атмосферы западно-сибирского сектора Арктики [26].

Цель данной работы – анализ результатов измерений концентрации ВС, выполненных на инструментальном комплексе ст. «Остров Белый», и исследование распределения источников загрязнений арктических аэрозолей на о-ве Белый в холодное и теплое время года.

Измерения и обработка данных

Остров Белый находится в Карском море, отделен проливом Малыгина от п-ва Ямал. Среднегодовая температура составляет –10,6 °С. Зимы продолжительные и холодные: в феврале средняя температура –24,2 °С (может достигать –59 °С), летом характерны туманы, средняя температура воздуха +5,3 °С. Месячное количество осадков – более 20 мм.

Анализируются данные наблюдений с августа по декабрь 2019 г. и с января по ноябрь 2020 г. Период с 1 ноября 2019 г. по 1 апреля 2020 г., а также ноябрь 2020 г., когда температура опускалась ниже –10 °С, обозначим как «холодный», остальное время – как «теплый». В холодный период доминировал континентальный ветер (Ю–ЮВ). С июня по сентябрь средняя температура держалась выше 0 °С, доминировали С–СВ ветра, что опреде-

лило преобладание океанических воздушных масс, приходящих с акватории Северного Ледовитого океана. В октябре с уменьшением инсоляции температура воздуха снизилась и держалась ниже 0 °С. Средняя скорость ветра за весь период наблюдений составила 5–10 м/с.

Исследовательская станция МГУ «Остров Белый» работает непрерывно с августа 2019 г. Ее положение на севере Западной Сибири (73°20'7,57" с.ш., 70°4'49,05" в.д.) относительно арктических ст. Зеппелин, Алерт, Барроу, Саммит, Тикси и «Ледовая база «Мыс Баранова»» показано на рис. 1. Павильон аэрозольного комплекса находится в полукилометре к юго-востоку от гидрометеорологической станции, где работает дизельный генератор – единственный на острове локальный источник загрязнения. Измерения, проведенные при направлении ветра со станции, исключались из массива данных. Изоляция ст. «Остров Белый» от антропогенных источников является основным преимуществом месторасположения инструментального аэрозольного комплекса, в отличие от ГМО Тикси, находящейся под значительным воздействием эмиссий близлежащего пос. Тикси [22].

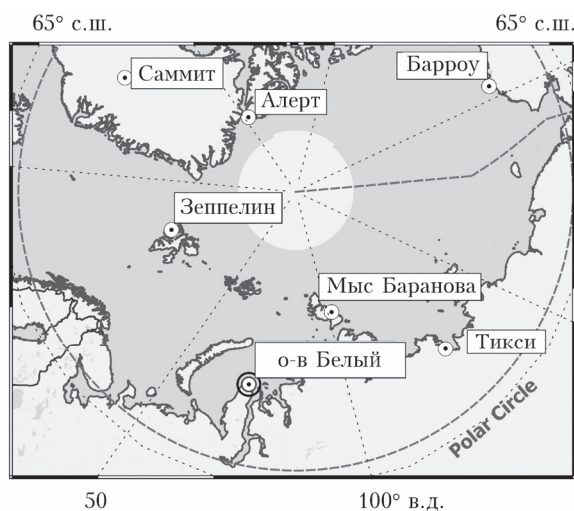


Рис. 1. Карта полярных аэрозольных станций

В павильоне станции установлена система непрерывного отбора проб, разработанная для суровых арктических условий. Аэталометр AE33 (Magee Scientific, Aerosol d.o.o.) используется для определения поглощательной способности частиц, осаждающихся на фильтре при прокачке воздуха с разными скоростями потока, которые дают коэффициент коррекции на поглощение внутри фильтра [27]. Измерения проводятся на семи длинах волн в диапазоне от ультрафиолетового (370 нм) до инфракрасного (950 нм) с разрешением 1 мин. Эффективность поглощения на длине волны 880 нм пересчитывается в эквивалентную концентрацию черного углерода eBC (880) с массовым коэффициентом 7,7 м²/г. Спектральная зависимость поглощения позволяет учесть увеличенное поглощение высокомолекулярного органического углерода в ультрафиолетовом диапазоне излучения по сравнению с инфракрас-

ным [28]. Разница между eBC (370) и eBC (880), называемая параметром Delta-C, оказывается значительной в эмиссиях сжигания биомасс [29, 30]. В данной работе параметр Delta-C используется в качестве индикатора влияния сжигания древесины в жилом секторе и лесных пожаров.

Определение фоновых аэрозольных концентраций в Арктическом регионе проводится при отсутствии влияния локального и регионального загрязнений [22, 31]. В данной работе за фоновую концентрацию принимается уровень 10 нг/м³, равный 20 перцентилем выборки за весь период измерений. Длительные события, в течение которых концентрации eBC превышали пороговое значение 90 нг/м³, равное 80 перцентилем выборки, идентифицируют эпизоды загрязнения.

С целью определения зоны влияния возможных удаленных источников эмиссий BC на уровень загрязнений на о-ве Белый с помощью модели HYSPLIT лаборатории Air Resources Laboratory [32] был рассчитан массив обратных траекторий переноса воздушных масс за все время наблюдений со временным интервалом 1 ч и 240 ч назад на высотах 100 и 500 м над уровнем земли (AGL) и пространственным разрешением 1° широты и 1° долготы. На его основе выполнен кластерный анализ сходных по происхождению и близости траекторий, в котором критерием разделения на кластеры служат угловые расстояния [33]. Траектория, вычисленная путем усреднения угловых расстояний между всеми траекториями, представляет данный кластер.

Метод отнесения траекторий переноса воздушных масс к концентрации загрязнений в момент их прихода в точку наблюдений (Concentration Weight Trajectories, CWT) является эффективным инструментом для анализа переноса загрязняющих атмосферу веществ и выявления их возможных источников [34]. При определении пространственных источников рассчитываются концентрации загрязнений C_{ij} для каждой ячейки сетки (i, j):

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

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

Получаемые по результатам длительных наблюдений поля концентраций C_{ij} позволяют установить связь между высокой C_k и траекториями движения воздушных масс, т.е. показывают области пространства с повышенной интенсивностью эмиссии и вероятное расположение источника. В данной работе региональное распределение источников BC определялось путем отнесения траекторий, рассчитываемых за весь период наблюдений, к концентрации в момент их прихода на станцию «Остров Белый». Метод основан на совместном анализе траекторий переноса воздушных масс и результатов аэталометрических измерений концентраций eBC.

Расположение газовых факелов определялось по спутниковым данным MODIS и VIIRS о свечении объектов с температурой выше 1200 °С, соответствующей факельному сжиганию газа (<https://viirs.skytruth.org/apps/heatmap/>). Данные о пожарной активности получены из системы Resource Management System (FIRMS), созданной NASA/GSFC Earth Science Data Information System (<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map>), спутникового зондирования термоактивных точек на поверхности Земли.

Результаты и обсуждения

Результаты многолетних исследований изменений аэрозольных компонентов на полярных станциях указывают на характерные для Арктики сезонные тренды [35]. Временной ряд среднемесячных значений eBC на ст. «Остров Белый» представлен на рис. 2. Самые высокие концентрации наблюдались с ноября по апрель (до 160 ng/m^3), а самые низкие — с июня по август (около 20 ng/m^3). Арктическая дымка регистрировалась с ноября 2019 г. по март 2020 г. Максимальная медианная концентрация составила 127 ng/m^3 в декабре 2019 г. В среднем летом концентрации были в 10 раз ниже, чем зимой, при минимальном значении 30 ng/m^3 в июле 2020 г. В течение второго года наблюдений низкий уровень концентраций летом и высокий зимой повторился. В сентябре 2020 г. eBC достигала аномально высокого значения 72 ng/m^3 , превысив в два раза значения в сентябре 2019 г.

Похожая варьированность ежемесячной eBC наблюдалась в 2015–2016 гг. на ГМО Тикси и характеризовалась высокими значениями (~ 130–230 ng/m^3) в зимне-весенний период и низкими (~ 20 ng/m^3) с мая по октябрь [22]. На ст. «Ледовая база “Мыс Баранова”» в этот же период зимой были зарегистрированы концентрации $142 \pm 120 ng/m^3$ с максимумом 350 ng/m^3 13 января 2016 г. и $67 \pm 43 ng/m^3$ летом [13].

Таким образом, во время Арктической дымки значения eBC на трех российских станциях «Остров Белый», ГМО Тикси и «Ледовая база “Мыс Баранова”» оказались выше уровня, измеренного в этот период на канадской ст. Алерт ($100 \pm 65 ng/m^3$), который, в свою очередь, был самым высоким среди значений, зарегистрированных всеми другими станциями в Арктике [36]. Такой результат подтверждает выводы [37] и [23] о том, что сибирская Арктика является наиболее загрязненной крупномасштабными эмиссиями евразийского континента среди других областей Арктики.

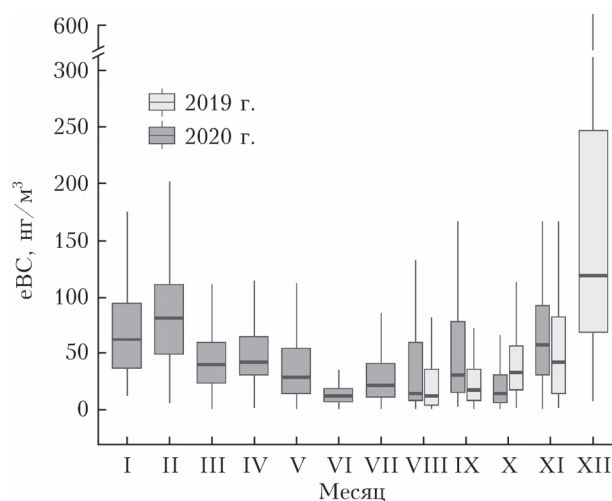


Рис. 2. Ежемесячная динамика медианных концентраций eBC в 2019 и 2020 гг. Высота прямоугольников показывает значения между первым и третьим квартилями, вертикальные линии — максимальное и минимальное значения, а горизонтальные — медианы

Анализ суточных данных, полученных в холодный и теплый периоды года, показал высокую варьированность eBC на фоне сезонного хода (рис. 3).

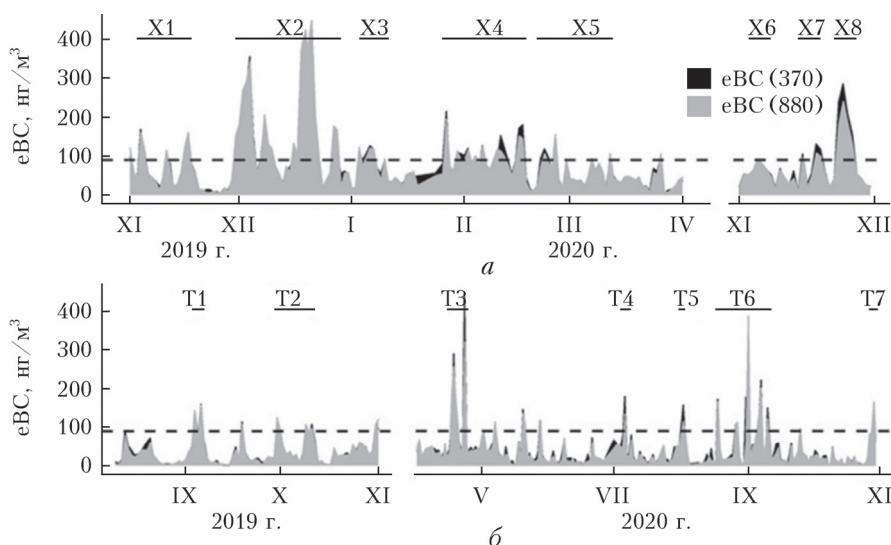


Рис. 3. Суточные медианные значения eBC (880) и eBC (370) в холодный (а) и теплый (б) периоды года; X1–X8, T1–T7 — эпизоды загрязнений; пунктирная линия указывает пороговое значение загрязнения атмосферы 90 ng/m^3

Выделяются эпизоды загрязнений, во время которых eBC превышает пороговое значение 90 нг/м^3 . В холодный период наблюдалось восемь эпизодов загрязнений (рис. 3, б). Во время первого эпизода Х1 высокие концентрации eBC случались трижды. Декабрь 2019 г. (Х2) характеризовался максимальными суточными значениями eBC за все время наблюдений – 350 и 420 нг/м^3 4 и 19 декабря. Второй по интенсивности эпизод загрязнения случился 24, 25 ноября 2020 г. $\sim 300 \text{ нг/м}^3$.

Кластерный анализ обратных траекторий в холодный период выявил, что зона влияния возможных источников BC располагается в основном на континентальной части Евразии и имеет характерные размеры в несколько тысяч километров (рис. 4, цв. вкладка). Доминирует кластер С1 траекторий, проходящих через север Скандинавии (рис. 4, а), включающий 46% всех траекторий за данный период. Кластеры С2 и С3 охватывают обширные территории Восточной Европы, европейской части РФ, Урала и Западной Сибири, частично Казахстана (24 и 16%). В меньшем объеме воздушные потоки приходят из приполярных областей Северного Ледовитого океана. Перенос воздушных масс из Восточной Сибири и с акватории Северного Ледовитого океана (кластер С4) оказался наименее значительным (13%).

В теплый период циркуляция воздушных масс существенно меняется. Воздушные потоки сильно смещаются к побережью Северного Ледовитого океана и охватывают его акваторию, а также полярные области северных провинций Канады, Аляски и районы Чукотского моря и Берингова пролива (рис. 4, б). В кластере С1 перенос происходил в основном из акватории океана с запада, в С2 и С3 – с северных территорий РФ (26 и 23%). В меньшей степени зона влияния располагается над континентальной частью Евразийского региона и островными арх. Северная Земля, Шпицберген, Новая Земля, Земля Франца-Иосифа и о-в Гренландия; 10% траекторий кластера С4 приходили с востока через обширный регион Северного Ледовитого океана.

В холодный период eBC (370) был выше, чем eBC (880) во время эпизодов загрязнения Х4, 5, 7 и 8 (рис. 5, а, цв. вкладка). Они характеризуются значениями ΔC от 20 (19 ноября 2020 г.) до 56 нг/м^3 (24 ноября 2020 г.), определяемыми преобладанием в это время эмиссий сжигания древесины в целях отопления жилого сектора. Отметим, что согласно базе данных российских эмиссий сжигание древесины составляет $\sim 61\%$ от общего объема выбросов в жилом секторе, особенно в районах ограниченного снабжения газом [38]. В теплый период наблюдались низкие значения eBC , которые редко превышали пороговое значение эпизодов загрязнения (рис. 5, б).

Расчеты полей концентраций BC по формуле (1) на основе результатов наблюдений на ст. «Остров

Белый» дали возможность оценить пространственное распределение основных источников эмиссий сжигания природных топлив и биомасс на материковой части евразийского континента в зависимости от сезона. В холодное время года воздушные массы приходили на о-в Белый с территории густонаселенных и промышленных районов Восточной Европы, европейской части РФ и Кольского п-ва. Распределение источников eBC в декабре 2019 г., в период, когда были зарегистрированы самые высокие загрязнения, показано на рис. 5, а. Самые высокие эмиссии BC обнаружены в Западно-Сибирском и Волго-Уральском нефтегазоносных бассейнах, в регионах – лидерах по добыче нефти и газа: Ханты-Мансийском и Ямало-Ненецком АО. Спутниковые данные о расположении газовых факелов крупнейших месторождений указывают на факельное сжигание газа как основной источник эмиссий BC в этих регионах (рис. 5, а). Региональное распределение источников BC , идентифицированных в июле, значительно отличается от декабрьского локализацией преимущественно на побережье Северного Ледовитого океана (рис. 5, б). В работе [39] было показано, что специфические условия циркуляции в атмосфере, сопутствующие лесным сибирским пожарам, могут способствовать снижению в это время эффективности переноса атмосферных примесей в арктические районы.

Особое влияние на загрязнение Арктики в теплый период года оказывает сжигание биомасс. Во время наших измерений интенсивные лесные пожары были зарегистрированы на севере Красноярского края, в Республике Саха, Центральной и Южной Сибири; с апреля по ноябрь 2020 г. выгорело около $7\,000\,000$ га леса (<https://aviales.ru/popup.aspx?news=6286>). Обширные сельскохозяйственные пожары на юге Сибири стали причиной сильного весеннего загрязнения Т3 (18 и 23 апреля 2020 г.), когда ΔC достигла 214 нг/м^3 (рис. 5, б), указывая на значительный вклад сжигания биомасс. Воздействие лесных пожаров отмечается в Т4 (7 июля 2020 г.) при $\Delta C = 100 \text{ нг/м}^3$ (рис. 5, б).

Самые высокие значения eBC наблюдались в сентябре 2020 г. во время эпизода Т6 (см. рис. 3, б). Максимум eBC (880) = 534 нг/м^3 (1 сентября 2020 г.) превысил пороговое значение в 5 раз, а арктический фоновый уровень – в 20 раз. Высокие значения $\Delta C = 209 \text{ нг/м}^3$ указывают на преимущественное загрязнение дымовыми эмиссиями пожаров. Траекторный анализ, проведенный на высотах 100 и 500 м AGL 1 сентября 2020 г., указывает на Красноярский край как регион источников многочисленных пожаров (рис. 6).

Таким образом, вынос дымовых шлейфов из регионов Сибири, а именно из Красноярского края и Якутии, где выгорело около миллиона гектаров

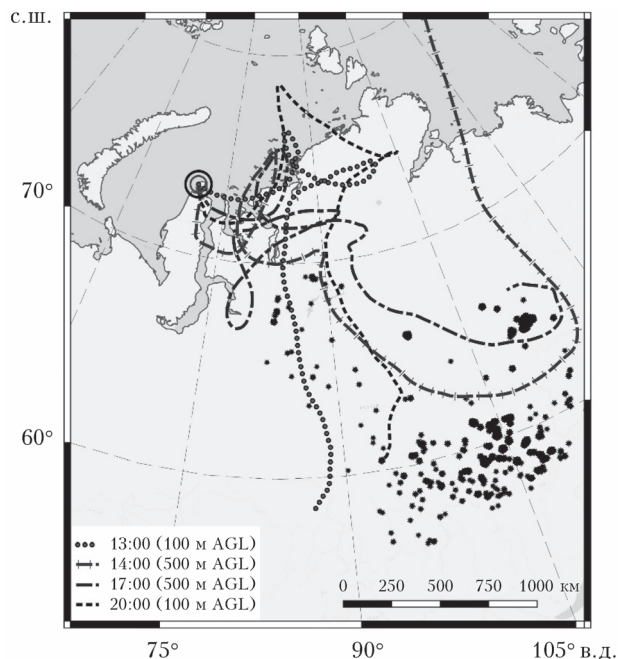


Рис. 6. Обратные траектории воздушных масс 1 сентября 2020 г. на высотах 100 и 500 м АГЛ в период эпизода загрязнения Т6; пожары в Красноярском крае в районе прохождения траекторий

леса, повлекло беспрецедентное загрязнение атмосферы Арктики в сентябре 2020 г. эмиссиями горения лесных биомасс.

Заключение

Непрерывные измерения поглощающей способности аэрозолей в широком диапазоне спектра солнечного излучения, выполненные на полярной ст. «Остров Белый», позволили впервые определить уровень аэрозольного загрязнения в западно-сибирском секторе Российской Арктики по концентрации черного углерода. Полученный годовой ход еВС характеризуется высокими значениями зимой во время арктической дымки и низкими — летом. В течение 16 мес наблюдений на ст. «Остров Белый» зарегистрировано 15 эпизодов загрязнений с концентрациями, достигавшими 420 нг/м^3 зимой и 534 нг/м^3 летом. Эпизоды в холодный период оказались более длительными, частыми и с большей интенсивностью, чем в теплый.

Основной причиной загрязнения Арктики в зимне-весенний период явился дальний перенос воздушных масс из низких широт. Благодаря уникальному месторасположению аэрозольного комплекса на пути выноса крупномасштабных эмиссий из индустриально развитых регионов определено пространственное распределение эмиссий факельного сжигания газа как основного источника черного углерода на территориях газовых и нефтяных месторождений Западной Сибири и Волго-Уральской нефтегазоносной провинции, подтверждаемое спутниковыми данными о расположении газовых факелов в этих регионах. Индикатор влияния сжигания биомасс

указал на преобладающее влияние сжигания древесины в жилом секторе густонаселенных районов Восточной Европы и европейской части РФ в холодный период, сельскохозяйственных и лесных пожаров на территории Красноярского края, Республики Саха, Центральной и Южной Сибири в теплое время года.

Полученные данные по поглощающей способности ВС в широком спектре солнечного излучения используются для оценки влияния источников сжигания природных топлив и биомасс.

Финансирование. Исследования проведены при финансовой поддержке РФ (проект № 22-17-00-102) и по Программе развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды». Методология развития инфраструктуры аэрозольного комплекса внедрена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 075-15-2021-938).

Список литературы

1. Quinn P.K., Stohl A., Arneth A., Bernsten T., Burkhart J., Christensen J., Flanner M., Kupiainen K., Lihavainen H., Shepherd M., Shevchenko V.P., Skov H., Vestreng V. The Impact of Black Carbon on Arctic Climate (2011). Oslo: Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), 2011. 72 p.
2. Wang Q., Jacob D.J., Fisher J.A., Mao J., Leibensperger E.M., Carouge C.C., Le Sager P., Kondo Y., Jimenez J.L., Cubison M.J., Doherty S.J. Sources of carbonaceous aerosols and deposited black carbon in the Arctic in winter–spring: Implications for radiative forcing // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11. P. 12453–12473.
3. Ren L., Yan 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 // *Atmos. Chem. Phys.* 2020. V. 20. P. 9067–9085.
4. Flanner M.G. Arctic climate sensitivity to local black carbon // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2013. V. 118. P. 1840–1851.
5. Quinn P.K., Bates T.S., Baum E., Doubleday N., Fiore A.M., Flanner M., Fridlind A., Garrett T.J., Koch D., Menon S., Shindell D., Stohl A., Warren S.G. Short-lived pollutants in the Arctic: Their climate impact and possible mitigation strategies // *Atmos. Chem. Phys.* 2008. V. 8. P. 1723–1735.
6. Sandradewi J., Prévôt A.S., Szidat S., Perron N., Alfarra M.R., Lanz V.A., Weingartner E., Baltensperger U. Using aerosol light absorption measurements for the quantitative determination of wood burning and traffic emission contributions to particulate matter // *Environ. Sci. Technol.* 2008. V. 42. P. 3316–3323.
7. Grange S.K., Lötscher H., Fischer A., Emmenegger L., Hueglin C. Evaluation of equivalent black carbon source apportionment using observations from Switzerland between 2008 and 2018 // *Atmos. Meas. Tech.* 2020. V. 13. P. 1867–1885.
8. 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. V. 5. P. 293–304.

9. Zhu C., Kanaya Y., Takigawa M., Ikeda K., Tanimoto H., Taketani F., Miyakawa T., Kobayashi H., Pisso I. FLEXPART V.10.1 simulation of source contributions to Arctic black carbon // *Atmos. Chem. Phys.* 2020. V. 20. P. 1641–1656.
10. Зенкова П.Н., Чернов Д.Г., Шмаргунов В.П., Панченко М.В., Белан Б.Д. Субмикронный аэрозоль и поглощающее вещество в тропосфере российского сектора Арктики по данным измерений самолета-лаборатории Ту-134 «Оптик» в 2020 г. // *Оптика атмосф. и океана.* 2021. Т. 34, № 11. С. 882–890; Zenkova P., Chernov D., Shmargunov V., Panchenko M., Belan B. Sub-micron aerosol and absorbing substance in the troposphere of the Russian Sector of the Arctic according to measurements onboard the Tu-134 Optik Aircraft Laboratory in 2020 // *Atmos. Ocean. Opt.* 2022. V. 35. P. 43–51.
11. Schmale J., Sharma S., Decesari S., Perron 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 // *Atmos. Chem. Phys.* 2022. V. 22. P. 3067–3096.
12. 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 // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. V. 9. P. 9315–9327.
13. Manousakas M., Popovicheva O., Evangeliou 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: Chem. Phys. Meteorol.* 2020. V. 72. P. 1–14.
14. 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 атмосф. 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.
15. 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.* Switzerland: Springer, 2014. P. 347–364. DOI: 10.1007/978-3-319-01017-5_20.
16. Cho M.-H., Park R.J., Yoon J., Choi Y., Jeong J.I., Labzovskii L., Fu J.S., Huang K., Jeong S.-J., Kim B.-M. A missing component of Arctic warming: Black carbon from gas flaring // *Environ. Res. Lett.* 2019. V. 14. P. 094011.
17. 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. P. 8833–8855.
18. Stohl A., Andrews E., Burkhart J., Forster C., Herber A., Hoch S., Kowal D., Lunder C., Mefford T., Ogren J. Pan-Arctic enhancements of light absorbing aerosol concentrations due to North American boreal forest fires during summer 2004 // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2006. V. 111. P. D11306.
19. Виноградова А.А. Эмиссии антропогенного черного углерода в атмосферу: распределение по территории России // *Оптика атмосф. и океана.* 2014. Т. 27, № 12. С. 1059–1065; Vinogradova A. Anthropogenic black carbon emissions to the atmosphere: Surface distribution through russian territory // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 2. P. 158–164.
20. Popovicheva O.B., Evangeliou 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. P. 3871–3879.
21. Schacht J., Heindl B., Quaas J., Backman J., Cherman R., Ehrlich A., Herber A., Huang W.T.K., Kondo Y., Massling A., Sinha P.R., Weinzierl B., Zanatta M., Tegen I. The importance of the representation of air pollution emissions for the modeled distribution and radiative effects of black carbon in the Arctic // *Atmos. Chem. Phys.* 2019. V. 19. P. 11159–11183.
22. Popovicheva O., Diapouli E., Makshatas A., Shonija N., Manousakas M., Saraga D., Uttal T., Eleftheriadis K. East Siberian Arctic background and black carbon polluted aerosols at HMO Tiksi // *Sci. Total Environ.* 2019. V. 655. P. 924–938.
23. Winiger P., Andersson A., Eckhardt S., Stohl A., Semiletov I.P., Dudarev O.V., Charkin A., Shakhova N., Klimont Z., Heyes C., Gustafsson Ö. Siberian Arctic black carbon sources constrained by model and observation // *Proc. Nat. Acad. Sci.* 2017. V. 114. P. E1054–E1061.
24. Winiger P., Andersson A., Eckhardt S., Stohl A., Gustafsson Ö. The sources of atmospheric black carbon at a European gateway to the Arctic // *Nat. Commun.* 2016. V. 7. P. 1–8.
25. Поповичева О.Б., Кобелев В.О., Сунцицкий А.И., Ситников Н.М., Чичаева М.А., Хансен А. Черный углерод городских эмиссий в Арктическом регионе по данным вблизи г. Салехарда // *Оптика атмосф. и океана.* 2020. Т. 33, № 9. С. 690–697.
26. Popovicheva O.B., Evangeliou N., Kobilev V.O., Chichaeva M.A., Eleftheriadis K., Gregorič A., Kasimov N.S. Siberian Arctic black carbon: Gas flaring and wildfire impact // *Atmos. Chem. Phys.* 2022. V. 22. P. 5983–6000.
27. 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 // *Atmos. Meas. Tech.* 2015. V. 5. P. 1965–1979.
28. 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. V. 49. P. 8408–8415.
29. 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 Air Qual. Res.* 2011. V. 11. P. 519–530.
30. 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 // *Environ. Sci. Technol.* 2011. V. 45. P. 7387–7393.

31. Eleftheriadis K., Nyeki S., Psomiadou C., Colbeck I. Background aerosol properties in the European arctic // *Water, Air Soil Pollut.: Focus*. 2004. V. 4. P. 23–30.
32. Stein A., Draxler R., Rolph G., Stunder B., Cohen M., Ngan F. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2015. V. 96. P. 2059–2077.
33. Draxler R.R., Hess G. An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories // *Aust. Meteorol. Mag.* 1998. V. 47. P. 295–308.
34. Shukurov K.A., Postilyakov O.V., Borovski A.N., Shukurova L.M., Gruzdev A.N., Elohov A.S., Savinykh V.V., Mokhov I.I., Semenov V.A., Chkhetiani O.G. Study of transport of atmospheric admixtures and temperature anomalies using trajectory methods at the A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics // *Proc. IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci.* 2019. V. 231. P. 012048. DOI: 10.1088/1755-1315/231/1/012048.
35. Stone R.S., Sharma S., Herber A., Eleftheriadis K., Nelson D.W. A characterization of Arctic aerosols on the basis of aerosol optical depth and black carbon measurements // *Elem Sci Anth.* 2014. V. 2. P. 000027.
36. Sharma S., Lavoué D., Cachier H., Barrie L., Gong S. Long-term trends of the black carbon concentrations in the Canadian Arctic // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2004. V. 109. P. D15203.
37. Eckhardt S., Quennehen B., Oliviù D.J.L., Berntsen T.K., Cherian R., Christensen J.H., Collins W., Crepinsek S., Daskalakis N., Flanner M., Herber A., Heyes C., Hodnebrog Ø., Huang L., Kanakidou M., Klimont Z., Langner J., Law K.S., Lund M.T., Mahmood R., Massling A., Myriokefalitakis S., Nielsen I.E., Nøjgaard J.K., Quaas J., Quinn P.K., Raut J.-C., Rumbold S.T., Schulz M., Sharma S., Skeie R.B., Skov H., Uttal T., von Salzen K., Stohl A. Current model capabilities for simulating black carbon and sulfate concentrations in the Arctic atmosphere: A multi-model evaluation using a comprehensive measurement data set // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15. P. 9413–9433.
38. Huang K., Fu J.S., Hodson E.L., Dong X., Cresko J., Prikhodko V.Y., Storey J.M., Cheng M.-D. Identification of missing anthropogenic emission sources in Russia: Implication for modeling Arctic haze // *Aerosol Air Qual. Res.* 2014. V. 14. P. 1799–181.
39. Виноградова А.А., Смирнов Н.С., Коротков В.Н. Аномальные пожары 2010 и 2012 гг. на территории России и поступление черного углерода в Арктику // *Оптика атмосф. и океана*. 2016. Т. 29, № 6. С. 482–487; Виноградова А.А., Смирнов Н.С., Коротков В.Н. Anomalous wildfires in 2010 and 2012 on the territory of Russia and supply of black carbon to the Arctic // *Atmos. Ocean. Opt.* 2016. V. 29, N 5. P. 545–550.

O.B. Popovicheva, M.A. Chichaeva, V.O. Kobelev, N.S. Kasimov. Black carbon seasonal trends and regional sources on Bely Island (Arctic).

The impact of aerosol sources on the atmosphere pollution of Russian Arctic sector is underestimated. The newly aerosol station was installed on Bely island (Kara sea) in August 2019, it is located on the way of air mass transportation from industrial regions of Western Siberia to the Arctic. Continuous aethalometric measurements of short leaving climate tracer – black carbon are carried out. They showed the seasonal variability with high values from December to April ($60 \pm 92 \text{ ng/m}^3$) and low in June–September ($18 \pm 72 \text{ ng/m}^3$). Pollution events with concentration higher background are identified. Regional distribution of fossil fuel and biomass burning sources are obtained by the concentration weight trajectory model. Impact of gas flaring from oil and gas extraction areas of Western Siberia, Volga-Ural, and Komi Republic is the most pronounced during the cold period while the wildfire smoke emissions are dominated in warm season. The difference between the black carbon concentrations in ultraviolet and infrared wavelength regions serves as a marker of biomass burning impact on the aerosol composition, indicating the residential wood combustion and agriculture and wildfires during cold and warm season, correspondently.

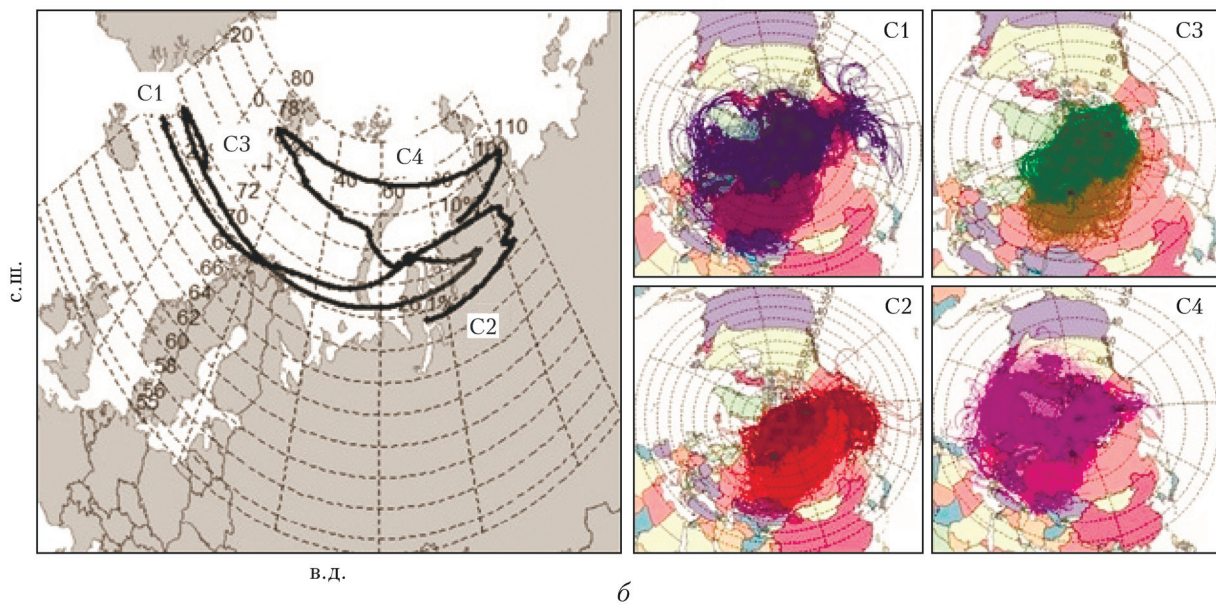
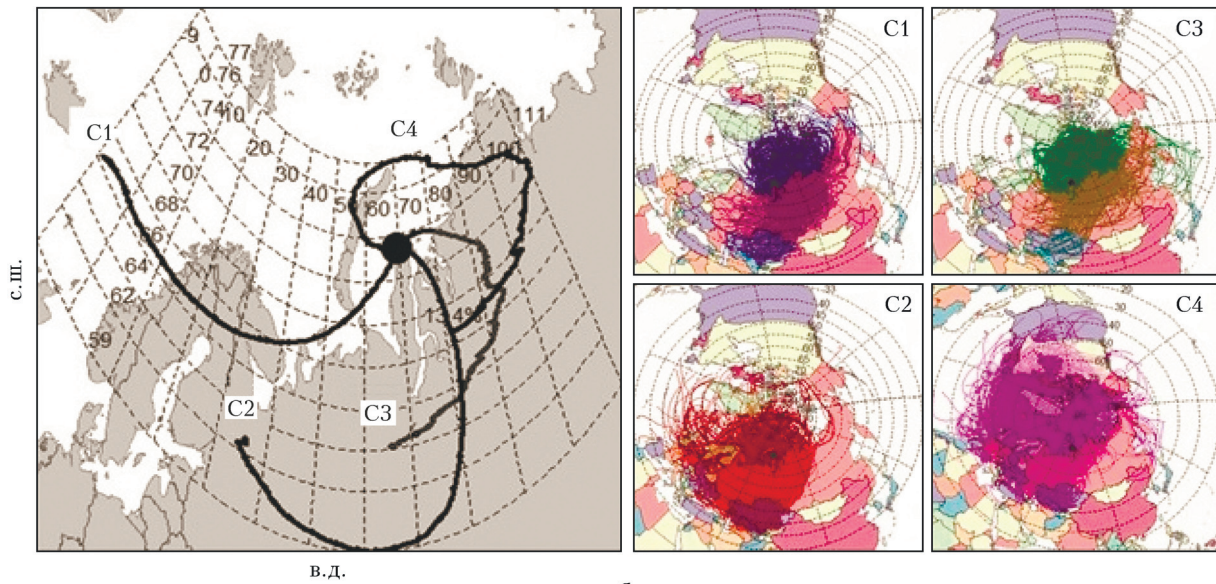


Рис. 4. Результаты расчета усредненных траекторий кластеров С1–С4 (слева) и обратных траекторий воздушных масс (справа) в холодный (а) и теплый (б) периоды года; черная точка – о-в Белый

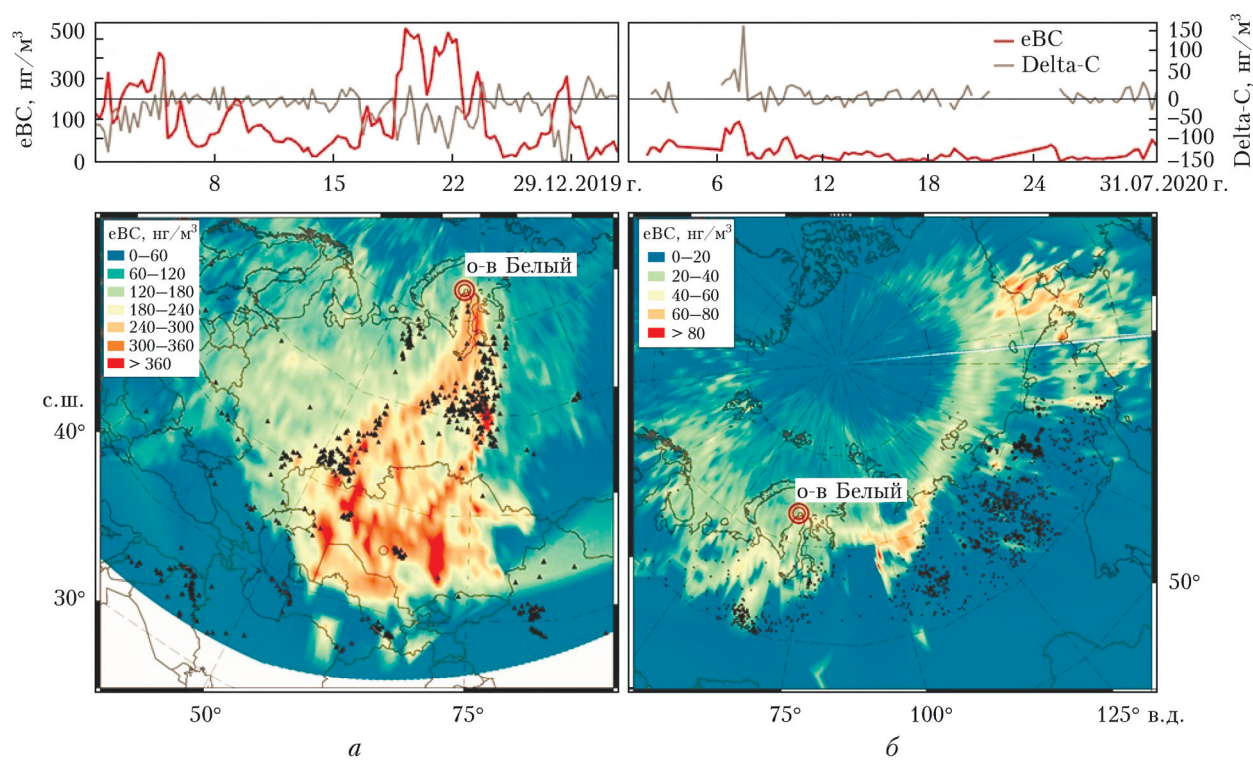


Рис. 5. Концентрация eBC и ΔC на о-ве Белый (вверху) и пространственное распределение источников BC в декабре 2019 г. (а) и июле 2020 г. (б); треугольники и точки – факельные установки нефтегазовых месторождений и очаги пожаров севернее 60° с.ш. соответственно