

Дальний атмосферный перенос черного углерода от сильных лесных пожаров в Сибири в Арктический бассейн

М.Ю. Бардин ^{1), 2), 3)*}

¹⁾ ФГБУ «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля»,
Россия, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, д. 20Б

²⁾ ФГБУН «Институт географии Российской академии наук»,
Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., д. 29

³⁾ ФГБУН «Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук»,
Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 3

* адрес для переписки: mick-bardin@yandex.ru

Реферат. Работа является частью исследования, посвященного влиянию переноса черного углерода (ЧУ) от различных источников в Арктику на изменение климата региона. Основными целями было разработать программное обеспечение для анализа лагранжева переноса воздушных частиц, оценки осаждения частиц аэрозоля выпадающими осадками и концентрации частиц в атмосфере и получить для конкретных условий атмосферной циркуляции при сильных пожарах в годы максимального уменьшения площади арктического морского льда оценки относительного времени пребывания воздушных частиц, выброшенных этими пожарами, над арктическим бассейном, а также доли осажденного в арктическом бассейне черного углерода от пожаров. Разработанный комплекс программ содержит модуль расчета лагранжевых траекторий по 4-мерному массиву ветра (u , v , ω , t), содержащему: горизонтальные компоненты ветра и аналог вертикальной скорости, доступному из реанализа, а также модули постпроцессинга полученных траекторий, позволяющие получить в заданной области оценки времени пребывания, 3-мерной концентрации ЧУ, осаждения ЧУ на поверхность, также с использованием данных реанализа и некоторых эмпирических констант. Поскольку основное уменьшение площади морского льда в Арктике происходило в 2 года: 2007 и 2012 – предполагалось анализировать пожары этих лет; но в 2007 году сильных пожаров не было, а в 2012 году один пожар значительно превосходил по размерам остальные (К-217, март-июнь). Этот пожар и был выбран для экспериментов: для него были получены несколько наборов траекторий, отвечающих различным вариантам выбора начальных условий, и для него получены оценки показателей доли траекторий, проходивших над арктическим бассейном, проведенного там времени и доли осажденного в арктическом бассейне черного углерода. Эти

оценки в совокупности позволили сделать вывод, что сибирские пожары едва ли могут быть ведущей причиной ускоренного таяния арктических льдов.

Ключевые слова. Лагранжевы траектории, лесные пожары, черный углерод, перенос, компоненты ветра, реанализ, постпроцессинг, осаждение.

Long-range atmospheric transport of black carbon from strong Siberian forest fires to the Arctic basin

M.Yu. Bardin^{1), 2), 3)}*

¹⁾ Yu.A.Izrael Institute of Global Climate and Ecology,
20b, Glebovskaya str., 107258, Russian Federation

²⁾ Institute of Geography, Russian Academy of Sciences,
29, Staromonetnyi lane, 119017, Moscow, Russian Federation

³⁾ Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences,
3, Pyzhevskii lane, 119017, Moscow, Russian Federation

*Correspondence address: *mick-bardin@yandex.ru*

Abstract. This paper is part of a study on the impact of black carbon (BC) transfer from various sources to the Arctic on regional climate change. The main goals were to develop software for analyzing the Lagrangian transport of air particles, assessing the deposition of aerosol particles by precipitation and the concentration of particles in the atmosphere, and, for specific atmospheric circulation conditions, to estimate the relative residence time over the Arctic basin of air particles emitted during severe fires in years of maximum decrease in the area of Arctic sea ice, as well as the share of black carbon deposited in the Arctic basin from these fires. The developed software package contains modules for calculating Lagrangian trajectories from a 4-dimensional wind array (u , v , ω , t): horizontal wind components and an analogue of vertical speed, time, available from the reanalysis, and the post-processing of the calculated trajectories (also using reanalysis data and empirical constants) that provides residence time estimates for a given area, 3-dimensional concentration of BC, deposition of BC on the surface. Since most of decrease in the Arctic sea ice area occurred in 2 years: 2007 and 2012, it was supposed to analyze the fires of these years; but in 2007 there were no strong fires, and in 2012 one fire was much stronger than the others (K-217, March-June). This fire was chosen for the experiments: several sets of trajectories, corresponding to various options for choosing the initial conditions, were calculated for this fire, and the indicators of the proportion of trajectories passing over the Arctic basin, the time spent there, and the fraction of black carbon deposited in the Arctic basin were estimated. Taken together, these estimates made it possible to conclude that Siberian fires can hardly be the principal cause of the accelerated Arctic ice melting.

Keywords. Lagrangian trajectories, forest fires, black carbon, transport, wind components, reanalysis, post-processing, deposition.

Введение

Поводом для настоящей работы явилась потребность в проверке широко распространенного мнения о существенном влиянии лесных пожаров на азиатской территории России на климат Арктики за счет дальнего переноса «черного углерода» (ЧУ; определение и физические свойства см. (Bond et al., 2013), в том числе, едва ли не превалирующем их вкладе в быстрое таяние льдов Арктического бассейна в начале XXI столетия (АМАР, 2015). Для оценки переноса в реальных условиях атмосферной циркуляции в период пожара была выбрана Лагранжева модель расчета траекторий частиц от заданного источника с использованием 4-мерного массива данных о ветре из данных реанализа. Этот подход достаточно распространен, начиная, по-видимому, с работы Methven et al., 1999. Ставилась цель разработки ПО, позволяющего конструировать и проводить различные эксперименты по расчету траекторий как для точечного источника, так и с учетом площади пожара, а также модулей постпроцессинга, которые позволили бы получить оценки пространственно-временного распределения ЧУ в атмосфере и осажденного на поверхность в периоды реально наблюдавшихся сильных пожаров для дальнейшей оценки его радиационного воздействия в климате Арктики.

На рис. 1 показаны ряды аномалии площади морского льда в Арктике после 1980 г. (данные NSIDC: National Snow and Ice Data Center <http://nsidc.org/soac/sea-ice.html#seaice>; (Fetterer et al., 2002). В основном тренд ледового покрытия наблюдается в конце лета – начале осени, и основное уменьшение площади льда произошло в два года: 2007 и 2012 – примерно на 1.1 и 0.8 млн. кв. км, соответственно. Можно ожидать, что именно в эти годы наблюдался наибольший эффект лесных пожаров. Однако, по данным Рослесхоза (Информационная система, 2019), на территории РФ в 2007 г. не наблюдалось крупных лесных пожаров. Это обстоятельство, по-видимому, решает в принципе вопрос о превалирующем влиянии лесных пожаров в азиатской части России (АЧР) на деградацию морских льдов в Арктике. Тем не менее, сильные пожары так или иначе могут оказывать влияние на климат региона, как за счет уменьшения альбедо поверхности при осаждении ЧУ на лед, так и за счет радиационного воздействия ЧУ, взвешенного в атмосфере. В последнем случае взвешенный ЧУ воздействует двояко: уменьшая проходящий поток коротковолновой радиации и увеличивая нисходящий поток инфракрасного излучения от нагретых частиц ЧУ. В (Гинзбург и др., 2020) на основе экспериментов с климатической моделью ИВМ РАН показано, что при определенных условиях (достаточном поступлении ЧУ в Арктику) суммарное радиационное воздействие положительно.

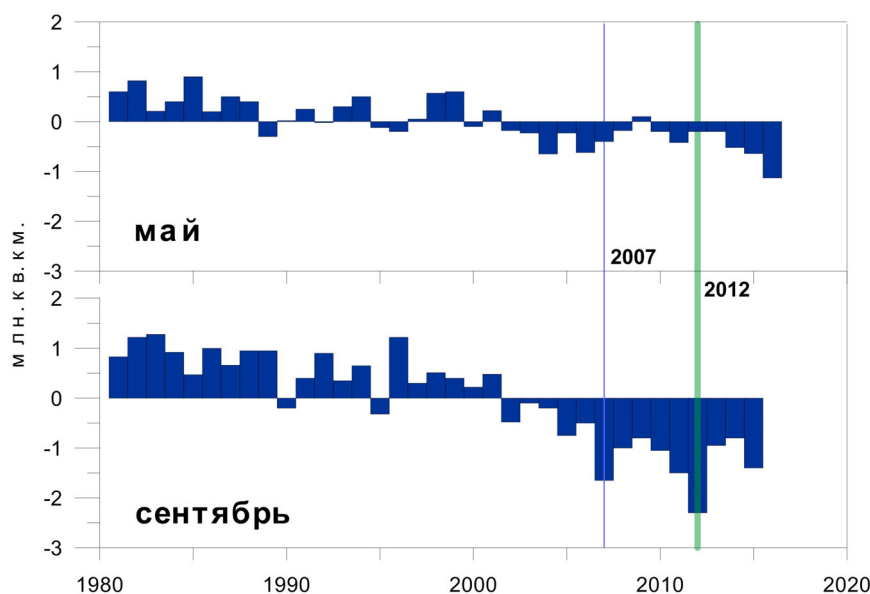


Рисунок 1. Аномалия площади морского льда относительно средних за 1979-2015 гг. (млн.кв. км) в Арктическом бассейне в мае и сентябре (учитывается вся акватория с долей покрытия льдом не менее 15%)
Данные NSIDC

Figure 1. Sea ice area anomaly relative to 1979-2015 averages (million square kilometers) in the Arctic Basin in May and September (the entire area with a share of ice coverage of at least 15% is taken into account)
Data: NSIDC

Методы и данные

Модель атмосферного переноса воздушных частиц заданным полем ветра

Для расчета дальнего атмосферного переноса в конкретных условиях атмосферной циркуляции, сопровождающих протяженный по времени лесной пожар, используется лагранжев подход. Траектории воздушных частиц, содержащих примесь ЧУ в виде взвеси, рассчитываются по известным полям ветра $\mathbf{W}(\mathbf{X})$ интегрированием уравнения переноса

$$d\mathbf{X}/dt = \mathbf{W}(\mathbf{X}), \quad (1)$$

где $\mathbf{X}=\mathbf{X}(t)$ – радиус-вектор частицы.

Уравнение переноса на сфере (представляющей поверхность Земли) удобно записать в следующем виде. Координаты $\mathbf{X}(x,y,z)$ определяются относительно осей (рис.1):

x – от центра к точке на экваторе с долготой 0;

y – то же, к точке с долготой 90°;

z – от центра к Северному полюсу.

Тогда (f, l) – обычные географические координаты: широта и долгота, R – радиус Земли)

$$\begin{aligned}x &= R \cos f \cos l, \\y &= R \cos f \sin l, \\z &= R \sin f\end{aligned}$$

и

$$\begin{aligned}R^{-1} dx/dt &= -\sin f \cos l \times df/dt - \cos f \sin l \times dl/dt \\R^{-1} dy/dt &= -\sin f \sin l \times df/dt + \cos f \cos l \times dl/dt \\R^{-1} dz/dt &= \cos f \times df/dt.\end{aligned}\tag{2}$$

В основных реанализах в качестве вертикальной скорости приводится ω , производная от давления, которое будет использоваться как вертикальная координата (направленная по нормали к поверхности к центру):

$$dp/dt = \omega.\tag{3}$$

Для решения системы (2, 3) используется полуняевная схема, известная, как «метод Эйлера с пересчетом», которая принципиально включает два шага:

Прогноз:

$$\mathbf{X}(t+h)_0 = \mathbf{X}(t) + h * \mathbf{W}(t, \mathbf{X}(t))$$

Коррекция:

$$\mathbf{X}(t+h)_{j+1} = \mathbf{X}(t) + 0.5 * h * (\mathbf{W}(t, \mathbf{X}(t)) + \mathbf{W}(t+h, \mathbf{X}(t+h)_j)).$$

Здесь $\mathbf{X}=\mathbf{X}(x,y,z,p)$, t и h – время и шаг по времени, $j=0, 1 \dots$ – номер итерации шага коррекции (итерация в принципе может повысить точность, но здесь не используется). Длина радиус-вектора (проекция вдоль p) $\mathbf{X}^D=\mathbf{X}^D(x,y,z)$ приводится к R : $\mathbf{X}^D(t+h) = R \mathbf{X}^D(t+h)_1 / \|\mathbf{X}^D(t+h)_1\|$ ($\|\bullet\|$ – обычная норма $(x^2+y^2+z^2)^{1/2}$).

Две проблемы возникают для полюса. Естественная: на полюсе не определена производная долготы. Рукотворная (но вытекающая из первой): что представлено в качестве горизонтальных компонент скорости на полюсе в данных реанализа – не описано в документации; реально там представлены $n!$ (по числу долгот) чисел (различных в случае ECMWF), про которые можно только догадываться – что это такое (в действительности, такие догадки имеются, но мы предпочтем оставить их при себе – тем более, что для двух основных систем, NCEP и ECMWF, они различны). Кроме того, в ECMWF (в ответ на заданный вопрос) предлагают вовсе не использовать эти данные как неправильные (заниженные), а пользоваться данными на ближайшей к полюсу широте (?). В результате был использован следующий прием: для малой круглой площадки S_p вокруг полюса (диаметром менее половины ближайшего к полюсу круга широты C_n) используется двумерная декартова система в касательной к поверхности плоскости в полюсе с осями oX вдоль нулевого меридиана и oY вдоль меридиана 90° . В этой системе на круге радиуса $r(C_n)$ пересчитываем зональную и меридиональную компоненты скорости во введенную систему координат

на всех меридианах сетки реанализа ($W_{n_{oXj}}$, $W_{n_{oYj}}$) и интерполируем в полюс (кривизной пренебрегаем, т.к. для используемых данных ECMWF шаг сетки 0.75° , а $\sin(89.25^\circ) > 0.9999$): ($W_{p_{oX}}$, $W_{p_{oY}}$). Для точки g внутри круга C_p значения скорости ($W_{g_{oX}}$, $W_{g_{oY}}$) интерполируем линейно между ($W_{n_{oXj}}$, $W_{n_{oYj}}$) и ($W_{p_{oX}}$, $W_{p_{oY}}$) для двух меридианов $j, j+1$, между которыми точка расположена, и также линейно между меридианами. Если на очередном шаге интегрирования траектория попадает в C_p , следующие шаги выполняются в координатах (oX , oY , p), пока траектория не выйдет за пределы C_p .

Заметим, что после каждого шага приходится пересчитывать найденные координаты (x, y, z) (либо (oX , oY)) конечной точки траектории в географические координаты, поскольку именно в них представлены данные реанализа.

Поскольку представление поля ветра (данные реанализа) дискретно, возникает необходимость интерполяции, в первую очередь – по сферическим координатам и по вертикали. В горизонтальной ячейке сетки реанализа интерполяция билинейная, по вертикали (давление) линейная.

В используемой схеме применена также интерполяция по времени. Обычный шаг по времени реанализа, 6 часов, разбивается на 4 интервала по 1.5 часа (т.е. добавляются 3 точки), которые и используются как шаги по времени. Интерполяция по времени кусочно-линейная: в начальной и конечной точках 6-часового интервала, наклон определяется соответственно левой и правой конечно-разностными производными 1-го порядка, в центральную точку интерполируются линейно между 1-й и 3-й дополнительными точками.

Использовались данные о компонентах горизонтального ветра и омега на изобарических поверхностях между 1000 и 200 гПа за 4 срока из реанализа ERA INTERIM (ECMWF) с шагом сетки 0.75° .

Выходные данные

Результатом блока расчета траекторий является файл, содержащий все траектории заданного эксперимента (см. ниже). Траектория представлена ее продолжительностью (число сегментов между сроками реанализа: в настоящее время 6-часовых) и для каждого срока координатами (f , l , p) и компонентами скорости. При этом ω представлена как в точке на траектории, так и максимальная по модулю отрицательная величина на изобарических поверхностях над этой точкой. Дальнейшие результаты получаются в результате постпроцессинга этого набора траекторий, использующего также необходимые данные реанализа.

Возможности построения экспериментов

– *прямые и обратные траектории*: имеется возможность задавать режим расчета обратных траекторий, т.е. обычная траектория, стартующая из конечной точки обратной, проходит тот же путь в обратном порядке;

– *набор стартовых точек с учетом площади пожара*: различия в площади имитируются числом траекторий. Стартовые точки выбираются из прямоугольной сетки $n_f \times n_l$ ячеек размером $df \times dl$ так, что площадь ячейки равна предписанной площади «элементарного» пожара (минимального, который

выбрасывает продукты горения в свободную атмосферу на определенную высоту); число точек n_{tr} равно площади наблюдаемого пожара, деленной на площадь элементарного. Выбор параметров n_f , n_l , df , dl позволяет до определенной степени управлять формой пожара (вытянутый зонально или меридионально). Высота старта задается единой для одного эксперимента;

– *время старта*: для одного эксперимента может быть задан набор времен старта, каждое со своим набором параметров для площади. Таким образом может быть учтена динамика пожара;

– *рандомизация*: ансамблю траекторий может быть придан характер (псевдо-) стохастического, т.е., определяемого стохастическим дифференциальным уравнением

$$d\mathbf{X}/dt = \mathbf{W}(\mathbf{X}) + \mathbf{S} \cdot \mathbf{e}(t),$$

где $\mathbf{e}(t)$ – стандартный гауссов шум, а $\mathbf{S}$ – диагональная матрица той же размерности, что и $\mathbf{X}$, определяющая стандартное отклонение шума для каждой компоненты ветра. Задается число псевдо-стохастических траекторий для каждого старта и матрица $\mathbf{S}$ (может задаваться непосредственно значениями на основе априорных соображений, либо в виде $k \cdot \mathbf{S}^{\wedge}$, где $\mathbf{S}^{\wedge}$ – матрица, где на диагонали стоят выборочные оценки стандартных отклонений компонент за время эксперимента, т.е. задается только k).

Осаждение ЧУ

«Сухое» гравитационное осаждение ЧУ происходит очень медленно из-за малых размеров частиц. Часть ЧУ попадает на поверхность вместе с воздушными частицами, чьи траектории попадают в приземный слой (мы считали, что нижняя граница траекторий – 950 гПа). Все же основное осаждение происходит как вымывание атмосферными осадками. Причем для дальнего переноса не имеет принципиального значения деление на гидрофильную и гидрофобную фракции, поскольку время превращения гидрофобного ЧУ в гидрофильный в атмосфере составляет порядка 1 дня (Koch et al., 2009). Среднее время жизни ЧУ в атмосфере оценивается величинами от примерно 4 до 11 дней, по-видимому, с наиболее вероятными значениями 5-7 дней (Bond et al., 2013), т.е. совпадает с характерными временами синоптических процессов. Вероятно, ЧУ вымывается практически полностью при прохождении полосы фронтальных осадков. Время вымывания считается обратно пропорциональным потоку осадков (Володин, Кострыкин, 2016): $\tau \sim (C \cdot I)^{-1}$, где $I (\text{м} \cdot \text{с}^{-1})$ – поток осадков, C – эмпирическая константа (принятая для ЧУ 150 м^{-1}). Таким образом, вымывание ЧУ в ячейке на траектории воздушной частицы определяется осадками, сформировавшимися в этой ячейке над траекторией и в вышележащих слоях тропосферы. Однако, обнаружилось, что в данных реанализа отсутствует вертикальное распределение осадков (это несколько странно, поскольку имеется интенсивность осадков у поверхности, которое есть интеграл в вертикальном столбе, а стало быть, используемая модель считает осадки в каждой вычислительной ячейке, и ничто не мешало привести осадки, проходящие через стандартные изобарические поверхности).

В результате были разработаны две схемы, позволяющие в определенной мере восполнить этот пробел.

1. **«Субъективная вероятность» осаджения.** Здесь при отсутствии данных о вертикальном распределении осадков для качественной оценки возможности вымывания ЧУ вдоль траекторий осадками была предложена шкала «субъективной вероятности», основанная на следующих простых соображениях.

Крайне маловероятно выпадение осадков при $\omega > -0.1 \text{ Па} \cdot \text{с}^{-1}$, вероятности выпадения и невыпадения равны при $\omega = -0.2 \text{ Па} \cdot \text{с}^{-1}$, выпадение весьма вероятно при $\omega < 0.4 \text{ Па} \cdot \text{с}^{-1}$ (Rose et al., 2003).

Максимум вероятности выпадения наблюдается около 700 гПа, с резким спадом выше 300 гПа (там же).

Предполагается, что весь ЧУ, попадающий в слой $p > 950 \text{ гПа}$, оседает в этой точке.

Комбинации этих границ для $\omega^* = \min(\omega_r, \omega_a)$ (минимальная из вертикальной скорости на и над траекторией: ЧУ увлекается как осадками, выпадающими в клетке, так и над ней) дают шкалу из 4 «вероятностей»: «ничтожно мала», «мала», «средняя», «существенная», – которым условно приписываются значения 0, 0.25, 0.5, 0.75.

2. **Параметризация осадков, по данным реанализа о термодинамическом состоянии влажной атмосферы.** В современных гидродинамических моделях используются весьма сложные параметризации и уравнения для процессов образования и выпадения осадков; во многих случаях адаптируются специально разработанные специализирующимися в этой области консорциумами «стандартные блоки» (см., например, Толстых и др., 2017 и приведенный там список литературы). Такого рода схемы работают именно как блоки моделей гидротермодинамики атмосферы и не могут быть использованы оффлайн. Поэтому был использован достаточно простой подход, разработанный для применения в ранних гидродинамических моделях, не включающий тройных фазовых переходов, процессов слипания, испарения капель и т.д.

По формуле Дюбюка (Белов и др., 1989) осадки в единичном столбе между уровнями $p_1 > p_2$ от момента времени t_0 до t_1

$$R = -g^{-1} \int_{t_0}^{t_1} \int_{p_1}^{p_2} C(p, T) \cdot \omega \cdot dp dt,$$

где: $C(p, T)$ – скорость конденсации в единице массы воздуха:

$$C(p, T) = \frac{\frac{q_m}{p} \cdot \left(\frac{R}{c_p} - \frac{LR}{c_p \cdot T \cdot R_{\Pi}} \right)}{1 + \frac{q_m \cdot L \cdot (L - R_{\Pi} \cdot T)}{c_p \cdot R_{\Pi} \cdot T^2}}$$

L – удельная теплота конденсации; R – удельная газовая постоянная сухого воздуха, R_{Π} – водяного пара, c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении,

$$q_m = \frac{0.622 \cdot E(T_d)}{p}$$

– массовая доля водяного пара, где

$$E(T_d) = E_0 \cdot \exp\left(\frac{a \cdot T'_d}{b + T'_d}\right)$$

– упругость насыщенного водяного пара:

$E_0 = 6.112$ гПа – упругость насыщенного водяного пара при 0°C ;

$a=17.62$; $b=243.12^\circ\text{C}$; $c=17.62$ (константы приведены в соответствии с (Sonntag, 1990)).

По формуле Магнуса

$$T'_d = \frac{b \cdot \Gamma(T', RH)}{c - \Gamma(T', RH)}$$

$$\Gamma(T', RH) = \ln(0.01RH) + \frac{cT'}{b + T'}$$

RH – относительная влажность.

T, RH, ω на стандартных изобарических поверхностях известны из реанализа. В простейшем предположении, что эти величины меняются линейно по времени, а $C(p, T)$ по вертикали, поток осадков через уровень $P_{tr}(t)$, на котором траектория воздушной частицы проходит в момент t , легко рассчитывается, откуда получается время осаждения и доля вымытого ЧУ.

Разновидность этого алгоритма использует осадки на поверхности из реанализа (суммарные осадки в столбе), а $C(p, T) \cdot \omega$ определяет профиль осадков по вертикали. Возможно, таким образом получают лучшие суммы осадков, т.к. модели реанализа используют гораздо более развитые схемы для расчета конденсации, испарения и т.д. и собственно выпадения осадков.

Расчет 3-мерной плотности частиц ЧУ в заданной области (с учетом или без учета осаждения): результаты нужны для расчета радиационного баланса в атмосфере с примесью ЧУ. Расчет ведется для проекций на набор плоскостей, перпендикулярных заданному лучу (отвечающему направлению на Солнце) для каждого срока, а также интегрально по направлению и за заданный период. Для расчета используется аппроксимация двумерной плотности с Гауссовым ядром.

Расчет 2-мерной плотности осажженных частиц ЧУ для оценки альбедо поверхности льда. Для расчета также используется аппроксимация двумерной плотности с Гауссовым ядром, с ограничением только для боксов заданной сетки с покрытием льдом не меньше заданного.

Результаты экспериментов

Один из наиболее крупных пожаров с 1990-х гг. произошел в мае 2012 (К-217): общая площадь, пройденная пожаром за период до 19 мая (формально пожар ликвидирован 17 июня, но фактически после указанной даты он был очень слаб), составила для территории, покрытой лесом, немногим менее 900 тыс. га. Именно для этого пожара было проведено несколько экспериментов; здесь представлены результаты двух из них.

Эксперимент без учета площади пожара

Траектории стартуют каждые 6 часов из единственной точки (53.25°с.ш., 125°в.д.), высота 700 гПа. Сами траектории, вертикальные скорости и высоты вдоль них показаны на рис. 2. В зону арктического бассейна (АБ: условно > 72°с.ш.) проникали 18 траекторий (25%), что значительно больше ранее полученных усредненных данных (до 10% (Гинзбург и др., 2020)). Однако, доля времени, в течение которого траектории наблюдаются над АБ, составляет в среднем по всем траекториям 5% (для траекторий, не попадающих в АБ°, время нахождения = 0). В большинстве точек вертикальная ω -скорость положительная либо небольшая отрицательная ($> -0.1 \text{ Па}\cdot\text{с}^{-1}$), т.е. траектории опускаются ($\omega > 0$) или слабо поднимаются. Отрицательные вертикальные скорости $\omega < -0.1 \text{ Па}\cdot\text{с}^{-1}$, свидетельствующие о возможности выпадения осадков и вымывания ЧУ, наблюдались в основном над сушей и вдоль южных траекторий в Тихом океане.

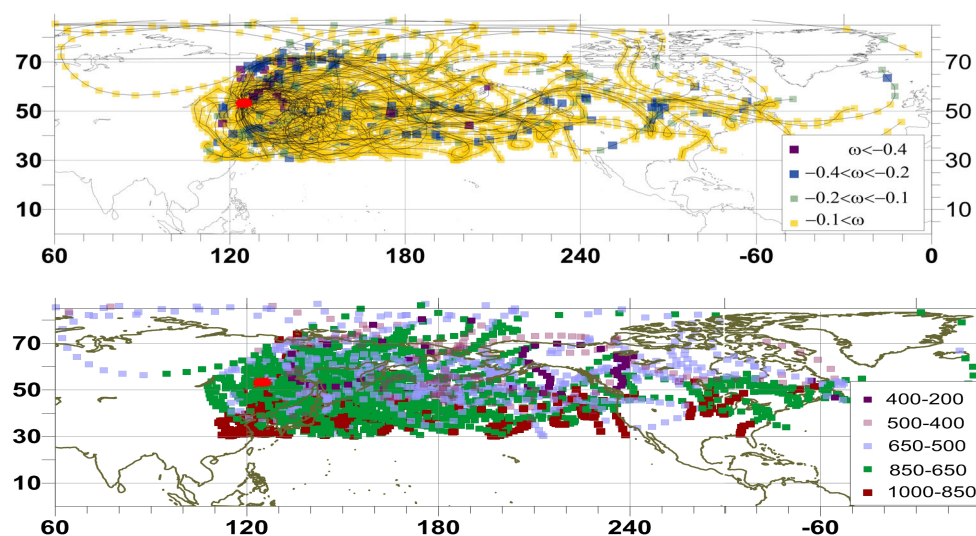


Рисунок 2. Траектории от пожара К-217 как точечного источника с 01.05.2012 00 GMT по 18.05.2012 18 GMT

Вдоль траекторий квадратиками показаны: на верхнем рисунке вертикальная скорость $\omega \text{ Па}\cdot\text{с}^{-1}$, на нижнем – высота в p -координатах (давление, гПа)

Figure. 2 Trajectories from the K-217 fire as a single point source from 05/01/2012 00 GMT to 05/18/2012 18 GMT

Squares along the trajectories denote: in the upper figure, the vertical velocity $\omega \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$, in the lower figure – the height in p -coordinates (pressure, hPa)

Эксперимент с учетом изменения площади пожара

На рис. 3 показаны траектории с учетом площади, пройденной пожаром за сутки, соответствующие старту. Площадь «элементарного» (минимального учитываемого) пожара 25000 га. Максимальное развитие пожара наблюдалось 17 мая (за сутки пройдено 385 тыс. га). Всего 31 траектория. Из них 10 попадали в область $f > 72^\circ\text{с.ш.}$ и проводили там определенное время; доля времени пребывания траекторий в этой области от суммарного времени (число траекторий $\times$ продолжительность одной траектории) составила 8%.

На рис. 3 показаны также значения «субъективной вероятности» осаднения ЧУ. Средняя «вероятность» для выпадения в одной из точек траекторий над Арктикой составляет 0.05, т.е. скорее ничтожно мала. Точки с существенной вероятностью расположены в основном над материками, в АБ – одна, севернее Гренландии, и несколько точек со средней вероятностью в Российском секторе.

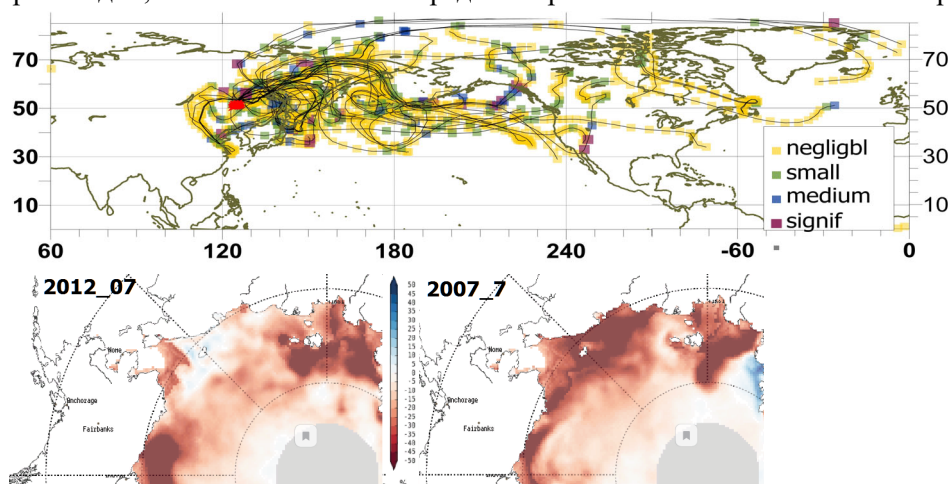


Рисунок 3. Траектории от пожара K-217 с учетом текущей площади пожара с 11.05.2012 00 GMT по 18.05.2012 18 GMT

Вдоль траекторий квадратики показаны «условные вероятности» осаднения ЧУ. Внизу: аномалия (%) концентрации морского льда (данные NSIDC)

Figure 3. Trajectories from the K-217 fire, with a set of starting points taking into account the current area of the fire from 11.05.2012 00 GMT to 18.05.2012 18 GMT
Squares along the trajectories show the "conditional probabilities" of BC deposition. Bottom: Sea ice concentration anomaly (%) (data: NSIDC)

Достаточно велика «вероятность» выпадения в какой-либо из 3 последовательных точек в Чукотском море, а также в районе Новосибирских о-вов: если допустить возможность умножения принятых условных значений, то вероятности *невыпадения* для них составят 0.06 и 0.28 (конечно, это чрезвычайно условно). Можно было бы предположить, что осажденный в этих районах ЧУ способствовал формированию аномалии концентрации льда летом в этих районах (нижний левый рисунок). Однако, в Чукотском море аномалии концентрации льда не было, а в районе Новосибирских о-вов такая же аномалия наблюдалась в 2007 г. (справа), когда крупных пожаров не было. По-видимому, ЧУ там не осаждался: это могло быть связано с тем, что вдоль этих траекторий имеются точки над материком с высокой вероятностью осаднения, так что ЧУ просто не долетал до АБ (см. ниже).

Осаждение ЧУ атмосферными осадками

Для несколько урезанного набора траекторий, по сравнению с предыдущим экспериментом, были получены статистики осаждения ЧУ осадками (использовался вариант алгоритма с осадками на поверхности из реанализа и профилем по вертикали, задаваемым $C(p, T) \cdot \omega$). Рассматривались только траектории, начинающиеся в период максимального развития пожара, 17 и 18 мая (за сутки на территории, покрытой лесом, пожаром пройдено соответственно 347 и 177 тыс. га). Высокая интенсивность пожара наблюдалась также 14 мая (112 тыс. га), но траектории, начавшиеся в этот день, не выходили в арктический бассейн.

Из 23 траекторий для 19 ЧУ полностью вымывался осадками (остаток менее 1% исходного количества) над сушей до выхода траектории в арктический бассейн. Тем не менее, для оставшихся 4 траекторий осаждение ЧУ в арктическом бассейне составило 83%, 82%, 67% и 27%. Таким образом, в целом осаждение над арктическим бассейном от рассматриваемого пожара составило около 10.5% выброшенного ЧУ. Отметим, что для 17 траекторий ЧУ за рассматриваемый двухнедельный период вымывался полностью, для 2 осталось около 5% и для 4 – более 10%. Географическое распределение осаждения ЧУ в арктическом бассейне показано на рис. 4. В основном осаждение происходило в районе Чукотского моря и, как указано выше, не приводило к заметной аномалии концентрации морского льда. Здесь распределение вымывания ЧУ осадками хорошо согласуется с полученными нами «субъективными вероятностями» (рис. 3). В то же время в районе Новосибирских о-вов осаждения не происходило, что подтверждает вывод предыдущего раздела. В целом, сравнение рисунков 3 и 4 указывает, что, по-видимому, «субъективные вероятности» более успешно оценивают факт отсутствия осаждения, в то время как при малых и средних вероятностях осаждение действительно может как происходить, так и отсутствовать.

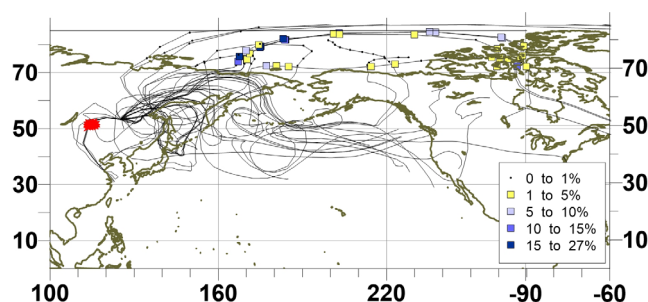


Рисунок 4. Вымывание ЧУ осадками вдоль траекторий от пожара К-217, начинающихся 17 и 18 мая, с учетом текущей площади пожара

Показано (только для арктического бассейна к северу от 72° с.ш.) вымывание за 6 часов (в % от начальной концентрации: разноцветные квадраты – см. легенду), привязанное к точке начала соответствующего отрезка траектории

Figure 4. Sedimentation of BC by precipitation along the trajectories from the K-217 fire, starting on May 17 and 18, taking into account the current area of the fire
Shown (only for the Arctic basin north of 72°N) is sedimentation for 6 hours (% of the initial concentration: multi-colored squares – see legend), tied to the start point of the corresponding trajectory segment

Устойчивость траекторий

Сравнение конфигураций пучков траекторий, исходящих из разных дат мая 2012 года из близких точек (25 траекторий из точек на сетке 0.01° широты на 0.02° долготы, т.е. около 1 км по широте и долготе, с левым нижним углом 53.25° с.ш., 125° в.д.) на рис. 5 показывает, что, во-первых, формы траекторий, стартующих в достаточно близкие сроки сильно различаются. Если на рис. 4 траектории практически не расходятся и перемещаются с основным западным потоком, то во всех остальных случаях они резко расходятся. Траектории, стартующие 4 мая, заматают, делая петли, обширную площадь на севере Тихого океана, после чего небольшая часть из них уходит в Арктику. Траектории от 9 мая резко расходятся на 5-6 день: часть движется на восток, другие – резко поворачивают на север и северо-запад, в Арктику, где также ведут себя достаточно причудливо: часть разворачивается на восток и заканчивается в районе Баффиновой Земли, другие – на запад, в моря российской Арктики. Траектория 16 мая демонстрирует простую картину неустойчивости, где траектории разделяются на 2 пучка, направленных первоначально на север (уходят в Арктику) и на юг, в Тихий океан. Таким образом, в общем траектории демонстрируют сильную неустойчивость и разнообразие конфигураций при изменении циркуляционных условий на протяжении единственного месяца. По-видимому, это делает маловероятным существование небольшого количества типов синоптических ситуаций, способствующих повышенному переносу воздушных частиц в определенном направлении, в том числе в арктический бассейн.

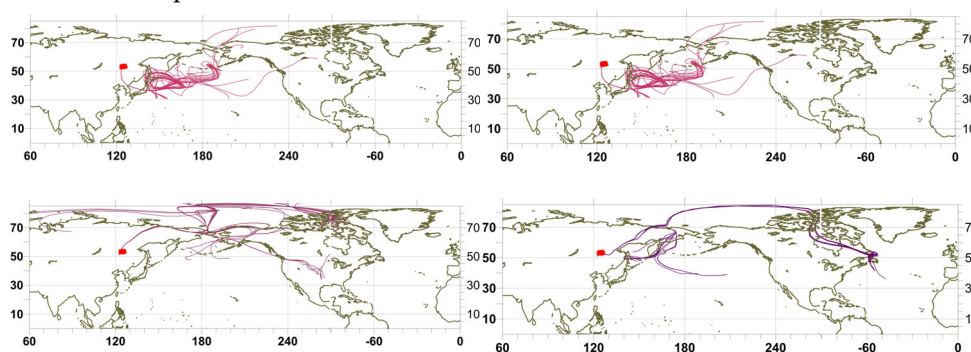


Рисунок 5. Траектории с началом в 25 точках (5×5) на поверхности 700 гПа с расстояниями 0.01° широты и 0.02° долготы 1 мая 2012 г. (а), 4 мая (б), 9 мая (в) и 16 мая (г)

Figure 5. Trajectories starting at 25 points (5×5) on the surface of 700 hPa with distances of 0.01° latitude and 0.02° longitude on May 1, 2012 (a), May 4 (b), May 9 (c), and May 16 (d)

В работе (Methven et al, 1999) показано, что лагранжев поток на сфере, определяемый ветром в баротропной модели атмосферы, обладает определенными свойствами «эргодичности»: под его действием малая площадка многократно растягивается и складывается («филаментация») таким образом, что ее образ через продолжительное время (порядка 10 суток в их экспериментах) достаточно равномерно заполняет некоторую циркумполярную область, форма и размеры которой зависят от последовательности полей ветра, генери-

руемых моделью при различных начальных условиях. Это дает возможность получить двумерную плотность ЧУ в этой области напрямую, не прибегая к тем или иным методам аппроксимации плотности распределения по дискретной выборке. Неясно, сохраняется ли в каком-либо смысле это свойство в трехмерном случае. Тем не менее, используемый авторами алгоритм преобразования контура площадки “contour advection” (Dritschel, 1989) позволил бы получить оценки плотности осажженного ЧУ по площади, а его трехмерный вариант (преобразование ячейки в виде параллелепипеда) – плотность ЧУ в атмосфере вдоль заданного направления (для оценки поглощения солнечной радиации).

Заключение

Разработан пакет программ для расчета лагранжевых траекторий воздушных частиц, по данным о компонентах ветра на стандартных изобарических поверхностях в узлах регулярной географической сетки и постпроцессинга расчетных траекторий для анализа осаждения частиц аэрозоля атмосферными осадками (для конкретного аэрозоля задается константа, определяющая скорость вымывания) и пространственного распределения концентрации в заданные моменты времени. Пакет позволяет управлять распределением стартовых точек траекторий по пространству и времени, таким образом, моделируя распределенные источники аэрозоля, такие, как лесные пожары.

В качестве приложения рассмотрен перенос и осаждение в арктическом бассейне черного углерода от конкретного сильного лесного пожара в Сибири в мае 2012 года (К-217). Такой выбор обусловлен предположением, что осаждение ЧУ от сибирских лесных пожаров является одним из ведущих факторов быстрого таяния морского арктического льда, а основное уменьшение площади льда произошло в два года: 2007 и 2012. Но в 2007 году в Сибири не было сильных лесных пожаров, а пожар К-217 2012 года был одним из самых мощных за последние десятилетия: всего за время пожара пройдено около миллиона гектар территории, покрытой лесом. Показано, что траектории исходили из единственного источника на высоте 700 гПа в период с 01.05.2012 00 GMT по 18.05.2012 18 GMT. Всего на территорию арктического бассейна выходили 25% всех траекторий; но средняя доля времени, в течение которого траектории находились над АБ, составила всего 5%.

Особый интерес представляет осаждение ЧУ в арктическом бассейне. Рассматривались только траектории от 17 и 18 мая (т.е. всего 8 сроков), поскольку за эти 2 дня пожар прошел более 50% всей территории покрытой лесом, пройденной пожаром с конца марта до начала июля. В каждый срок стартовали от 3 до 5 траекторий (в соответствии с текущей площадью пожара) с центров площадок размером 25 тыс. га. Для 83% траекторий весь ЧУ вымывался вне арктического бассейна (из траекторий, выходивших в АБ – для 64%). Всего на АБ осаждено около 10.5% выброшенного пожаром 17 и 18 мая ЧУ, причем из них почти 7% в Чукотском море и еще 1.5% на о-вах Канадского полярного архипелага. Как показывают данные NSIDC, летом

2012 года в Чукотском море не наблюдалось заметного уменьшения площади льда и даже наблюдалась на значительной части моря отрицательная аномалия, так что какое-то влияние на таяние льда от пожара К-217 могли оказывать лишь около двух процентов его выброса. В остальные дни существования пожара его интенсивность лишь дважды превышала 25 тыс. га (более мелкие пожары, по-видимому, не могли выбрасывать ЧУ на достаточную высоту): 14 мая 112 тыс. га (но траектории от этих суток не выходили в арктический бассейн) и 38 тыс. га 24 апреля – почти в 10 раз меньше, чем 17 мая. Летом 2012 г. были еще два сравнительно крупных пожара: К-667 (всего 293 тыс. га леса; максимальное развитие 31 июля: 143 тыс. га) и К-1884 (169 тыс. га всего, 1 августа 141 тыс. га). Но выбросы этих пожаров могли попасть в АБ лишь в августе и уже не могли оказать существенного влияния на таяние льдов. Таким образом, совместно с тем обстоятельством, что в 2007 г., когда наблюдалось максимальное уменьшение площади арктического льда, в Сибири не было крупных лесных пожаров, ЧУ от которых мог бы попадать в Арктику, эти данные 2012 года не подтверждают утверждение о ведущей роли Сибирских пожаров в таянии льдов Арктики.

Благодарности

Автор благодарен В.А. Гинзбург за консультации по физическим свойствам черного углерода и В.Н. Короткову за предоставленные данные о пожарах 2012 года.

Работа выполнена при поддержке РФФИ: 18-05-60183 – «Процессы и последствия дальнего атмосферного переноса черного углерода и радионуклидов в Арктике» и Росгидромета – тема 3.2 «Мониторинг глобального климата и климата Российской Федерации и ее регионов, включая Арктику. Развитие и модернизация технологий мониторинга».

Список литературы

Белов, П.Н., Борисенков, Е.П., Панин, В.Д. (1989) *Численные методы прогноза погоды*, Л., Гидрометеиздат, 376 с.

Володин, Е.М., Кострыкин, С.В. (2016) Аэрозольный блок в климатической модели ИВМ РАН, *Метеорология и гидрология*, № 8, с. 5-17.

Гинзбург, В.А., Кострыкин, С.В., Ревокатова, А.П., Рябошапко, А.Г., Пастухова, А.С., Коротков, В.Н., Полумиева, П.Д. (2020) Короткоживущие климатообразующие аэрозоли от лесных пожаров на территории России: модельные оценки вероятности переноса в Арктику и возможное влияние на климат региона, *Фундаментальная и прикладная климатология*, № 1, с. 21-41.

Толстых, М.А., Шашкин В.В., Фадеев Р.Ю., Шляева А.В., Мизяк В.Г., Рогутов В.С., Богословский Н.Н., Гойман Г.С., Махнорылова С.В., Юрова А.В. (2017) *Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза*, Москва, Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, 166 с.

Информационная система 2019. Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ Рослесхоз) (2019) Электронный ресурс. URL: https://nffc.aviales.ru/main_pages/index.shtml.

AMAP (2015) *Arctic Monitoring and Assessment Programme, AMAP Assessment 2015: Black Carbon and Ozone as Arctic Climate Forcers (Arctic Monitoring and Assessment Programme, 2015)*, Oslo. 116 p.

Bond, T.C., Doherty, S.J., Fahey, D.W., Forster, P.M., Berntsen, T.B., DeAngelo, J.M., Flanner, G., Ghan, S., Kärcher, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quinn, P.K., Sarofim, M.C., Schultz, M.G., Schulz, M., Venkataraman, C., Zhang, H., Zhang, S., Bellouin, N.S., Guttikunda, K., Hopke, P.K., Jacobson, M.Z., Kaiser, J.W., Klimont, Z., Lohmann, U., Schwarz, J.P., Shindell, D., Storelvmo, T., Warren, S.G., Zender, C.S. (2013) Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment, *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 118, pp. 5380-5552.

Dritschel, D. (1989a) Contour dynamics and contour surgery: Numerical algorithms for extended, high-resolution modelling of vortex dynamics in 2-D, inviscid, incompressible flows, *Comput. Phys. Rep.*, vol. 10, pp. 78-146.

Fetterer, F., Knowles, K., Meier, W., Savoie, M. (2002) *Updated daily. Sea Ice Index*. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center. <http://dx.doi.org/10.7265/N5QJ7F7W>.

Koch, D. et al. (2009) Evaluation of black carbon estimations in global aerosol models, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 9(22), pp. 9001-9026, doi:10.5194/acp-9-9001-2009.

Methven, J., Berrisford, P., Hoskins, B. (1999) A lagrangian climatology for the North Atlantic, *Hadley Centre Technical Note*, no. 9.

Methven, J., Hoskins, B. (1999) The advection of high-resolution tracers by low-resolution winds, *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 56, pp. 3262-3285.

Rose, Brian, E., Charles, J., Lin A. (2003) Precipitation from vertical motion: a statistical diagnostic scheme, *Int. J. Climatol.*, vol. 23, pp. 903-919.

Sonntag, D. (1990) Important new values of the physical constants of 1986: vapour pressure formulations based on the IST-90 and psychrometer formulae, *Z. Meteorol.*, vol. 70(5), pp. 340-344.

References

Belov, P.N., Borisenkov, Ye.P., Panin, V.D. (1989) *Chislennyye metody prognoza pogody* [Numerical Methods for Weather Forecasting,], Leningrad, Gidrometeoizdat, Russia, 376 p.

Volodin, Ye.M., Kostrykin, S.V. (2016) Aerosol'nyy blok v klimaticheskoy modeli IVM RAN [Aerosol block in the climatic model of the INM RAS], *Russian Meteorology and Hydrology*, no. 8, pp. 5-17.

Ginzburg, V.A., Kostykin, S.V., Revokatova, A.P., Ryaboshapko, A.G., Pastukhova, A.S., Korotkov, V.N., Polumiyeva, P.D. (2020) Korotkozhivushchiye klimatoobrazuyushchiye aerizoli ot lesnykh pozharov na territorii Rossii: model'nyye otsenki veroyatnosti perenosa v Arktiku i vozmozhnoye vliyaniye na klimat regiona [Short-lived climate-forming aerosols from forest fires in Russia: model estimates of the probability of transport to the Arctic and possible impact on the climate of the region], *Fundamental and Applied Climatology*, no. 1, pp. 21-41.

Tolstykh, M.A., Shashkin, V.V., Fadeyev, R.YU., Shlyayeva, A.V., Mizyak, V.G., Rogutov, V.S., Bogoslovskiy, N.N., Goyman, G.S., Makhnorylova, S.V., Yurova, A.V. (2017) *Sistema modelirovaniya atmosfery dlya besshnovnoy prognoza* [Atmosphere modeling system for seamless prediction], Moscow, Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation, Russian, 166 p.

Informatsionnaya sistema 2019. Informatsionnaya sistema distantsionnogo monitoringa Federal'nogo agentstva lesnogo khozyaystva (ISDM Rosleskhoz). (2019), [Information system for remote monitoring of the Federal Forestry Agency (ISDM Rosleskhoz)], Electronic resource: https://nffc.aviales.ru/main_pages/index.shtml.

AMAP (2015) *Arctic Monitoring and Assessment Programme, AMAP Assessment 2015: Black Carbon and Ozone as Arctic Climate Forcers (Arctic Monitoring and Assessment Programme, 2015)*, Oslo. 116 p.

Bond, T.C., Doherty, S.J., Fahey, D.W., Forster, P.M., Berntsen, T.B., DeAngelo, J.M., Flanner, G., Ghan, S., Kärcher, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quinn, P.K., Sarofim, M.C., Schultz, M.G., Schulz, M., Venkataraman, C., Zhang, H., Zhang, S., Bellouin, N.S., Guttikunda, K., Hopke, P.K., Jacobson, M.Z., Kaiser, J.W., Klimont, Z., Lohmann, U., Schwarz, J.P., Shindell, D., Storelvmo, T., Warren, S.G., Zender, C.S. (2013) Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment, *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 118, pp. 5380-5552.

Dritschel, D. (1989a) Contour dynamics and contour surgery: Numerical algorithms for extended, high-resolution modelling of vortex dynamics in 2-D, inviscid, incompressible flows, *Comput. Phys. Rep.*, vol. 10, pp. 78-146.

Fetterer, F., Knowles, K., Meier, W., Savoie, M. (2002) *Updated daily. Sea Ice Index*. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center. <http://dx.doi.org/10.7265/N5QJ7F7W>.

Koch, D., et al. (2009) Evaluation of black carbon estimations in global aerosol models, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 9(22), pp. 9001-9026, doi:10.5194/acp-9-9001-2009.

Methven, J., Berrisford, P., Hoskins, B. (1999) A lagrangian climatology for the North Atlantic, *Hadley Centre Technical Note*, no. 9.

Methven, J., Hoskins, B. (1999) The advection of high-resolution tracers by low-resolution winds, *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 56, pp. 3262-3285.

Rose, Brian, E., Charles, J., Lin A. (2003) Precipitation from vertical motion: a statistical diagnostic scheme, *Int. J. Climatol.*, vol. 23, pp. 903-919.

Sonntag, D. (1990) Important new values of the physical constants of 1986: vapour pressure formulations based on the IST-90 and psychrometer formulae, *Z. Meteorol.*, vol. 70(5), pp. 340-344.

Статья поступила в редакцию (Received): 10.05.2021.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 20.05.2021.

Принята к публикации (Accepted): 06.11.2021.

Для цитирования /For citation:

Бардин, М.Ю. (2021) Дальний атмосферный перенос черного углерода от сильных лесных пожаров в Сибири в Арктический бассейн, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 7, № 4, с. 26-43, doi:10.21513/2410-8758-2021-4-26-43.

Bardin, M.Yu. (2021) Long-range atmospheric transport of black carbon from strong Siberian forest fires to the arctic basin, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 7, no. 4, pp. 26-43, doi: 10.21513/2410-8758-2021-4-26-43.