

**КОРОТКОЖИВУЩИЕ КЛИМАТООБРАЗУЮЩИЕ АЭРОЗОЛИ
ОТ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ:
МОДЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ ПЕРЕНОСА
В АРКТИКУ И ВОЗМОЖНОЕ ВЛИЯНИЕ
НА КЛИМАТ РЕГИОНА**

В.А. Гинзбург^{1,2)}, С.В. Кострыкин^{1,3,4)}, А.П. Ревокатова^{1,5)},
А.Г. Рябошапка, А.С. Пастухова, В.Н. Коротков¹⁾, П.Д. Полумиева¹⁾*

¹⁾Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля
РФ, 107258, Москва, Глебовская ул., д. 206;
*адрес для переписки: veronika.ginzburg@gmail.com

²⁾Институт географии РАН
РФ, 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 29

³⁾Институт вычислительной математики РАН им. Г.И. Марчука
РФ, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 8

⁴⁾Институт физики атмосферы РАН им. А.М. Обухова
РФ, 119017, Москва, Пыжевский пер., 3

⁵⁾Гидрометцентр Росгидромета
РФ, 123242, Москва, Большой Предтеченский переулок, 11-9

Реферат. Цель работы – оценка вероятности переноса черного углерода от модельных лесных пожаров высокой интенсивности в таежной зоне, определение полей концентраций и выпадений черного углерода на ледово-снежную поверхность и оценка вклада черного углерода в изменение климата Арктики. На основе анализа данных дистанционного мониторинга выбраны модельные регионы с наибольшей вероятностью возникновения крупных лесных пожаров (Республика Коми, Красноярский край и Республика Саха (Якутия)). Выполнен анализ вероятности переноса облака выбросов от модельных пожаров на ледовую поверхность Арктики с использованием траекторной модели HYSPLIT. Показано, что вероятность прохождения частицы, выброшенной на севере России в зоне бореальной тайги, через районы Северного-Ледовитого океана, покрытые морским льдом, составляет 1-10%. Климатические эффекты черного углерода (влияние на радиационный баланс) в арктической зоне оценивались на основе глобальной климатической модели ИВМ РАН. По результатам проведенных модельных экспериментов влияние черного углерода на баланс коротковолновой радиации от всех пожаров Северного полушария составляет $0.11 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ при облачных условиях и $0.21 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ при ясном небе. Оцененное воздействие на баланс коротковолнового излучения показывает увеличение притока на 1.5-2% по сравнению со сценарием без источников выбросов. Результаты моделирования показали, что влияние выбросов

черного углерода от природных пожаров на Арктический регион, покрытый льдом, незначительно.

Ключевые слова. Черный углерод, Арктика, лесные пожары, аэрозоли, изменение климата.

Введение

Принято считать, что основное влияние на изменение климата оказывают парниковые газы, характерной особенностью которых является их продолжительное время жизни в атмосфере. В последние 10-15 лет возрос интерес к климатическим эффектам короткоживущих климатически-активных веществ (Lavoue et al., 2000; IPCC, 2007), относительно короткое время жизни которых создает предпосылки возникновения климатических эффектов регионального уровня, например, в Арктике (AMAP, 2015).

К короткоживущим климатообразующим веществам принято, в частности, относить продукты неполного сгорания с высоким содержанием углерода. В их ряду важную роль играют аэрозоли, цвет которых близок к черному, способные поглощать солнечную радиацию в видимой области спектра и переизлучать энергию в инфракрасной области, что приводит к нагреву окружающего их воздуха. Кроме того, выпадая на снежную или ледовую поверхность, такие частицы темного цвета снижают альбедо, что также приводит к дополнительному нагреву приповерхностного слоя воздуха. Таким образом наличие поглощающего свет темного вещества в воздухе и на поверхности ведет к дополнительному нагреву нижнего слоя атмосферы и, тем самым, усугубляет климатическую проблему Арктики. Вещества, обладающие такими свойствами, чаще всего обозначают общим термином «черный углерод».

Огромную сложность в понимание механизмов климатического воздействия частиц, способных интенсивно поглощать солнечное излучение, вносит отсутствие четкого представления об их химическом составе и физических свойствах. В научной литературе можно найти несколько близких по значению терминов, что затрудняет понимание предмета исследований: сажа (soot), черный углерод (black carbon – BC), эквивалент черного углерода (eBC), элементарный углерод (elementary carbon – EC), коричневый углерод (brawn carbon – BrC), углеродистое вещество (carbonaceous matter). Использование того или иного термина чаще всего определяется примененным методом отбора проб и их анализа, а также конкретным источником поступления в атмосферу (Buseck et al., 2012). Наиболее часто в литературе встречаются как синонимы два термина, определяемые следующим образом (IPCC, 2007, 2013):

– «сажа» – это частицы, образованные в результате охлаждения внешних слоев пламени сгорания в виде паров органических соединений, состоящие преимущественно из углерода с малым количеством кислорода и водорода;

– «черный углерод» – это аэрозольные частицы, определяемые на основе измерений коэффициента поглощения света, химической активности и (или) температурной стабильности.

«Сажа» и «черный углерод» часто используются в публикациях на равных основаниях, что говорит об отсутствии твердого обоснования, является ли «сажа» частью «черного углерода», или «черный углерод» входит в состав сажи, или эти термины эквивалентны друг другу. Поскольку определение сажи дается исходя из процесса образования частиц в результате сгорания органических соединений, а для понимания климатического эффекта важны оптические свойства частиц, то в данной работе мы остановимся на термине «черный углерод».

По литературным данным, размеры аэрозольных частиц, содержащих черный углерод, составляют от 0.01 до 1 мкм (UNEP/WMO, 2011). Время жизни частиц черного углерода в атмосфере варьируется от 5 (Koch et al., 2009) до 15 (Кароль и др., 2013) дней. По всей видимости, в атмосфере происходит процесс коагуляции частиц, приводящий к образованию более крупных агломератов, аэродинамический размер которых может достигать 100 мкм (<http://www.carbon-black.org>). При этом по мере удаления от источника частицы меняют свои гигроскопические свойства и размеры, что сказывается на механизмах и скоростях их осаждения на поверхность. Принято выделять черный углерод, образующийся в результате сжигания биомассы (лесные пожары, травяной пал и т.д.), биотоплива (дрова, древесный уголь и др.) и ископаемого топлива (уголь, нефтепродукты) (AMAP, 2015).

Источники выбросов черного углерода весьма разнообразны и связаны как с природными, так и антропогенными процессами. Суммарно глобальная антропогенная эмиссия черного углерода (на 2000 год) оценивается величиной 7500 тыс. тонн с возможным разбросом значений от 2000 до 29000 тыс. тонн, т.е. ошибка в оценке глобальной эмиссии черного углерода может превышать порядок величины (Bond et al., 2013).

Инвентаризация выбросов черного углерода в настоящее время не входит ни в климатическую отчетность, представляемую странами в секретариат Конвенции по изменению климата, ни в обязательную отчетность по загрязняющим веществам, подготавливаемую в рамках Конвенции о трансграничном переносе загрязняющих веществ, ни в национальную отчетность предприятий по выбросам загрязняющих веществ. Поэтому достоверных данных об объемах выбросов черного углерода в России нет. По оценкам (Huang et al., 2015), выбросы черного углерода на территории России оцениваются величиной примерно 220 тыс. тонн в год (на 2010 год), что составляет около 7% мирового выброса (U.S. EPA, 2012; AMAP, 2015).

Среди прочих важным источником выбросов черного углерода на территории России являются лесные пожары – около 70 тыс. тонн в год в среднем за период с 2000 по 2013 г. (Романовская и др., 2016). Зона бореальных лесов России, где создаются условия возникновения масштабных лесных пожаров, простирается практически на все восточное полушарие, а их северная граница примыкает к южной границе Арктики. Это создает предпосылки переноса продуктов горения лесов, включая черный углерод, в Арктику и выпадения их на снежную/ледовую поверхность. Например, в работе (Shindell, Faluvegi, 2009) указывается, что рост температуры Арктики в те-

ние 1976-2007 гг. составил 1.48°C , при этом вклад черного углерода в нагрев мог превышать 0.5°C .

Характерные условия переноса в атмосфере и осаднения на поверхность различаются в зависимости от сезона. В летний период за счет адвекции более теплых воздушных масс из более низких широт над холодными арктическими поверхностями образуются облака слоистого типа, которые способствуют выведению черного углерода из атмосферы (Sharma et al., 2013). В то же время зимой Арктический фронт опускается южнее, что обеспечивает возможность переноса выбросов в Арктический регион из более южных территорий.

Отдельную сложность при сравнении результатов работ, касающихся климата Арктики, привносит то обстоятельство, что нет единой трактовки термина «Арктика». Чаще всего этот термин трактуют, как территорию, лежащую севернее Полярного круга. Эта территория составляет 21 млн км^2 . Однако, часть Арктики приходится на сушу и на открытую воду, где климатический эффект черного углерода невелик. Ледовый/снежный покров в Северном Ледовитом океане характерен для существенно меньшей площади особенно в теплый сезон (период лесных пожаров): в летние месяцы площадь ледового покрытия по данным Арктического и Антарктического НИИ Росгидромета в последние годы составляла в среднем 7.4 млн км^2 . Наличие черного углерода в атмосфере и его выпадения именно на ледово-снежную поверхность способно вызвать климатический эффект потепления.

Целью данной работы является оценка влияния выбросов черного углерода от пожаров, моделирующих гипотетическую ситуацию полного сгорания доступной биомассы в ячейке модельной сетки, на изменение радиационного баланса Арктики. Для этого авторами рассчитаны выбросы черного углерода от модельных лесных пожаров высокой интенсивности в зонах европейской и азиатской бореальной тайги; проведены оценки вероятности переноса черного углерода от модельных лесных пожаров в Арктическую зону; определены поля концентраций и осаднения черного углерода на ледово-снежную поверхность; дана оценка вклада черного углерода в изменение компонентов радиационного баланса Арктики.

Следует отметить, что свой вклад в неопределенность оценок вносит спорадический характер такого явления как лесной пожар и огромная вариабельность интенсивности выбросов черного углерода, сопровождающих индивидуальные лесные пожары. Поскольку нет однозначного представления о химическом составе содержащих черный углерод аэрозольных частиц и их физических (в первую очередь оптических) свойствах, приведенные ниже оценки могут носить лишь полуколичественный характер.

Используемые методики и материалы

В данной работе для исследования влияния выбросов черного углерода на радиационный баланс и свойства снежно-ледовой поверхности Арктики проведены анализ статистических данных о частоте и площади лесных пожаров на территории России и выбор регионов с наибольшей вероятностью возникнове-

ния крупных лесных пожаров; оценка распространения выбросов черного углерода от модельных лесных пожаров на территории России; анализ вероятности переноса облака выбросов от модельных пожаров на ледовую поверхность Арктики с использованием траекторной модели HYSPLIT (Stein et al., 2015) (<http://www.arl.noaa.gov/ready>); и расчеты с использованием глобальной климатической модели ИВМ РАН для оценки климатических эффектов черного углерода на арктическую зону – баланса коротковолновой радиации.

Для оценки выбросов черного углерода использовались данные Информационной системы дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства РФ (ИСДМ Рослесхоз) по площадям земель, поврежденных пожарами в 2000-2015 гг. в разрезе субъектов РФ (Информационная система..., 2019), при этом были выделены площади, пройденные низовыми и верховыми пожарами. Расчет выбросов черного углерода от низовых и верховых пожаров проводился с использованием методических подходов, представленных в публикациях (Смирнов и др., 2015; Романовская и др., 2016).

Одним из подходов к оценке вероятности переноса частиц ЧУ от лесных пожаров в России в зону, покрытую морским льдом, было использование траекторной модели HYSPLIT, которая позволяет рассчитывать траектории переноса в реальных условиях, т.е. при заданных полях метеорологических величин в определенный период времени. Эта модель представляет собой автономную систему, которая позволяет рассчитывать траектории, как отдельных частиц воздуха, так и весь комплекс химической трансформации, дисперсии и осаждения частиц. Наиболее частые задачи, для которых применяется модель HYSPLIT – это расчет обратных траекторий, а также моделирование распространения загрязняющих веществ, например, дыма от лесных пожаров, вулканической сажи, радиоактивных частиц. Метод расчета, используемый в модели, представляет собой гибридный лагранжевый подход (для расчетов адвекции и диффузии) и эйлерова метода (используется фиксированная трехмерная сетка). В качестве исходных метеорологических данных может быть выбрано несколько источников, из которых мы использовали данные реанализа Национального центра экологического прогнозирования США (The National Centers for Environmental Prediction) (NCEP, 2019).

Численные эксперименты, описывающие климатическое воздействие черного углерода от лесных пожаров на Арктику, проводились с помощью модели климата Института вычислительной математики (ИВМ) РАН, которая позволяет получить статистику переноса ЧУ в рамках ансамбля метеорологических условий, воспроизводимых в модельном эксперименте.

Модель ИВМ состоит из двух основных блоков – динамики атмосферы и динамики океана. В атмосфере разрешение составляет 2×1.5 градуса по долготе и широте и 21 уровень по вертикали до высоты 10 гПа. В океане разрешение 1×0.5 градуса по долготе и широте и 40 уровней по вертикали. Модель ИВМ дополнена аэрозольным блоком (Володин и др., 2013; Володин, Кострыкин, 2016), в котором рассчитывается эволюция концентрации десяти веществ: мелкой и крупной морской соли, мелкой и крупной континентальной пыли, сернистого газа, сульфатного аэрозоля, гидрофобного и гидрофильного

чёрного углерода, гидрофобного и гидрофильного органического углерода. Эволюция аэрозольных частиц включает в себя перенос, горизонтальную и вертикальную диффузию, химическую трансформацию, гравитационное осаждение, вымывание осадками, поглощение поверхностью. Скорость эмиссии веществ на поверхности, предписана или рассчитывается диагностически в зависимости от типа аэрозоля.

Результаты

Оценка распространения выбросов черного углерода от модельных лесных пожаров на территории России. Оценка влияния лесных пожаров на территории России на перенос и выпадение черного углерода в Арктике уже проводилась рядом авторов. Например, в работах Виноградовой и др. (2015, 2016), показано, что даже в период экстремальных лесных пожаров в 2010 и 2012 годах чувствительность арктических территорий к воздействию черного углерода от пожаров невелика. Это может быть связано со специфическими условиями циркуляции в атмосфере, сопутствующими экстремально сильным пожарам, которые способствуют снижению в это время эффективности переноса атмосферных примесей в арктические районы (Виноградова и др., 2016). Кроме того, влияние антропогенного черного углерода на азиатское побережье Российской Арктики значительно больше, чем от природных пожаров (Виноградова и др., 2015; Evans et al., 2017). Однако, по-прежнему считается, что выбросы черного углерода от лесных пожаров на территории России являются одним из основных источников поступления черного углерода в арктических регион и, как следствие, одной из основных причин увеличения таяния льда в Арктике (AMAP, 2015).

Поэтому в данной работе предпринята попытка оценить потенциал влияния черного углерода от лесных пожаров при гипотетическом сценарии одновременного сгорания наибольшей доступной площади лесов, равной ячейке модельной сетки, при наибольшей интенсивности горения на наиболее северных территориях России, покрытых лесами.

Для определения оптимальных районов-источников был проведен анализ статистических данных Рослесхоза (Информационная система..., 2019) для трех районов, выбор которых обуславливался, в первую очередь, наличием в них таежных лесов и лесистостью более 80%. Другим важным условием выбора гипотетического пожарного района была близость к северной границе России. Первое и второе условия накладывают взаимные ограничения, так как наиболее северные районы, покрытые средней и южной тайгой с лесистостью более 80%, расположены в широтной зоне от 60° до 64° с.ш. Поскольку в дальнейшем в работе проводится оценка климатического воздействия черного углерода с помощью глобальной климатической модели ИВМ РАН, работающей с модельной сеткой разрешением 2x1.5 градуса по долготе и широте, то предполагается, что все расчетные пожары для каждого из регионов сконцентрированы в единственной выбранной модельной ячейке. На основании этих условий, а так же для учета различных циркуляционных особенностей,

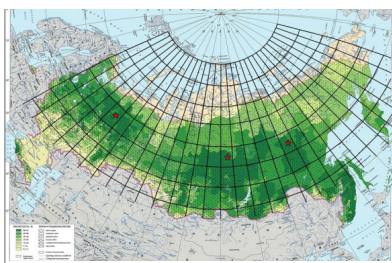
способствующих выносу продуктов горения в Арктику, были выбраны ячейки, расположенные в трех регионах: на европейской территории России (Республика Коми – центр ячейки 60°с.ш., 52.5°в.д.), в центральной Сибири (Красноярский край – центр ячейки: 60°с.ш., 102.5° в.д.) и в восточной Сибири (Якутия – центр ячейки: 60°с.ш., 102.5° в.д.).

Основываясь на статистических данных о средней площади лесных пожаров за период с 2000 по 2015 год (табл. 1) в качестве основного расчетного месяца был выбран август. Именно в августе пожары охватывают максимальные территории: в республике Коми – 14964 га, в Красноярском крае – 126317 га и в Якутии – 344602 га. В остальные месяцы площадь возгорания в Коми и Красноярском крае на порядок или несколько порядков ниже. Исключение составляет Якутия, где в сентябре площадь, покрытая пожарами, снижается относительно августа незначительно. Распределение площади лесных пожаров по месяцам и расположение выбранных модельных ячеек представлены на рис. 1.

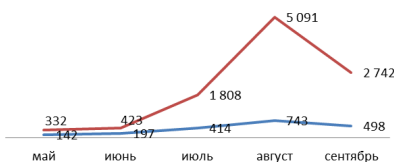
Таблица 1. Статистика по пожарам в рассматриваемых регионах по данным Рослесхоза (Информационная система..., 2019).

Table 1. Statistics on fires in the considered regions according to the Rosleskhoz data (Information system ..., 2019)

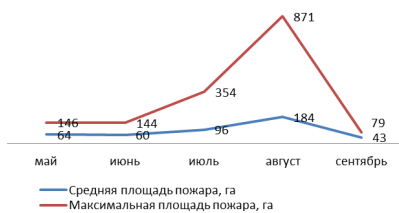
Месяц	Республика Коми		Красноярский край		Республика Саха (Якутия)	
	Ср./макс. площадь одного пожара (га)	Ср./макс. Кол-во пожаров	Ср./макс. площадь одного пожара (га)	Ср./макс. Кол-во пожаров	Ср./макс. площадь одного пожара(га)	Ср./макс. Кол-во пожаров
Май	64/146	1/6	142/322	122/400	72/177	21/115
Июнь	60/144	2/8	197/423	91/286	1226/8470	23/108
Июль	96/354	4/17	414/1808	47/230	1400/6203	41/205
Август	184/871	25/223	743/5091	46/308	4712/22922	75/277
Сентябрь	43/79	1/3	498/2742	18/80	5610/40642	29/147



Красноярский край



Коми



Якутия

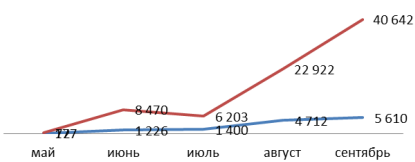


Рисунок 1. Расположение выбранных модельных ячеек (1а) и распределение средней и максимальной площади одного пожара за период 2000-2015 гг. в выбранных регионах

Figure 1. The location of the selected model cells (1a) and the distribution of the average and maximum single fire areas for 2000-2015 in selected regions

Для модельных пожаров принят сценарий возгорания на площади равной наибольшей площади пожаров, зафиксированной за период с 2000-2015 гг.

Таблица 2. Параметры модельных пожаров и выбросов черного углерода

Table 2. Parameters of simulated fires and black carbon emissions

	Республика Коми	Красноярский край	Республика Саха (Якутия)
Координаты центра ячейки	60°с.ш.; 52.5°в.д.	60°с.ш.; 102.5°в.д.	60°с.ш.; 127.5°в.д.
Площадь ячейки, га	1 854 100	1 854 100	1 854 100
Максимально возможная площадь пожаров при лесистости 80% (га)			
Верховые пожары	296 656	296 656	296 656
Низовые пожары	1 186 624	1 186 624	1 186 624
Параметры выбросов			
Продолжительность	30 дней	30 дней	30 дней
Выброс в зоне пожара, кг/га	34.97	33.56	18.41
Выброс на м ² ячейки с учетом доли площади пожара, кг/м ² сек	1.26719E-12	7.11075E-12	3.11305E-11
Выброс на м ² ячейки с учетом лесистости 80%, кг/м ² сек	2.69828E-09	2.58952E-09	1.42017E-09

Обсуждение

Оценка вероятности переноса частиц от лесных пожаров в Арктику

Параметры модели HYSPLIT. С помощью траекторной модели HYSPLIT рассчитывалась вероятность, с которой частица, вышедшая из центра каждой из указанных выше ячеек, будет иметь ту или иную траекторию. Для расчетов использовалась версия модели, позволяющая задавать повторяющиеся в течение месяца каждые 12 часов выбросы с заданной одинаковой локацией, высотой и мощностью эмиссии. Полученные вероятности переноса в каждую точку определяются как сумма частоты прохождения траектории для всех повторяющихся эпизодов выбросов. Расчеты проводились для периодов 31 день (август) и 30 дней (сентябрь). Каждый день модель стартовала дважды: в 0 и 12 часов. Продолжительность каждого расчета составляла 5 дней – это оценка примерного времени жизни черного углерода, приведенная в работе (Koch et al., 2009). Таким образом, для каждого из выбранных регионов было рассчитано по 60-62 траектории, на их основании считалась вероятность переноса частиц от локального источника в Арктику. Высота источника была задана равной 1500 метров. Как показано в работе (Paris et al., 2009) эмиссия от лесных пожаров гомогенно распределяется в слое от земной поверхности до 3000 метров. Нами была выбрана высота, соответствующая середине этого слоя. В реальности, во время лесных пожаров из-за активного прогревания нижнего слоя воздуха возникают мощные конвективные потоки, забрасывающие продукты горения на большие высоты. Так как в используемой версии

модели HYSPLIT нет учета этого эффекта, мы искусственным образом завысили высоту выбросов, опираясь на эмпирические данные, приведенные в работе (Paris et al., 2009).

Расчет переноса частиц из источника, расположенного в Якутии, проводился для двух месяцев – августа и сентября. Главным фактором, определяющим перенос частиц, является синоптическая обстановка. Блокирующие антициклоны, способные определять циркуляционный режим неделями, а также циклонические серии, год от года сильно варьируют условия переноса частиц в Арктику. Исходя из конфигурации атмосферных вихрей, вынос аэрозолей в Арктику наиболее вероятен при возникновении пожара на северной и западной периферии антициклона и в теплом секторе (южной периферии) и восточной части циклона, движущихся по траекториям, выходящим к северным морям. Таким образом, именно южные и юго-западные ветры способствуют перемещению аэрозоля в Арктику. Согласно климатическим данным с 1981 по 2010 гг. в августе для всех трех ячеек повторяемость ветров южного и юго-западного направлений составляет порядка 30-40% (<http://www.pogodaiklimat.ru>). Мы проводили расчеты для каждого года с 2000 по 2016, а затем выбирали годы с максимальной вероятностью переноса частиц в зону, покрытую морским льдом.

Карты вероятности для каждого из источников представлены на рис. 2. Как можно заметить, вероятность прохождения траектории частицы вблизи источника максимальна, а с увеличением расстояния она убывает. Все траектории, проходящие по Арктике, имеют вероятность от 1 до 10%. На приведенных картах отображены годы, когда максимальное число траекторий попадало в зону, покрытую морским льдом. Граница морского льда в Арктике оценивалась по картам плотности морского льда, которые были построены по данным реанализа NCEP для каждого августа исследуемого периода. Эти карты использовались авторами для качественной оценки возможного попадания траекторий частицы на снежную и ледяную поверхность, поскольку именно этот эффект может оказать значимый эффект на климат Арктики.

Нужно заметить, что в период с 2000 по 2016 год, были годы, когда синоптическая ситуация полностью препятствовала попаданию частиц в Арктику (и на поверхность морского льда). Рис. 2 призван на качественном уровне помочь оценить вероятность переноса частиц от источников, расположенных в различных зонах. При наиболее благоприятной, с точки зрения переноса, ситуации из ячейки, расположенной в республике Коми (рис. 2а), частица за 5 суток может быть перенесена через всю Арктику к северу Канады, отдельные траектории проходят через море Лаптевых и Восточно-Сибирское море, часть частиц имеет шанс быть перенесенными до берегов Гренландии. Максимальная вероятность, с которой каждая траектория пройдет через Арктику, составляет 10%, что в количественном выражении соответствует 3 дням за месяц. Однако теоретическая вероятность переноса частицы черного углерода существенно снижается, если принять во внимание тот факт, что гипотетический пожар должен действовать именно в течение указанных выше трех дней, когда синоптическая обстановка была наиболее благоприятной.

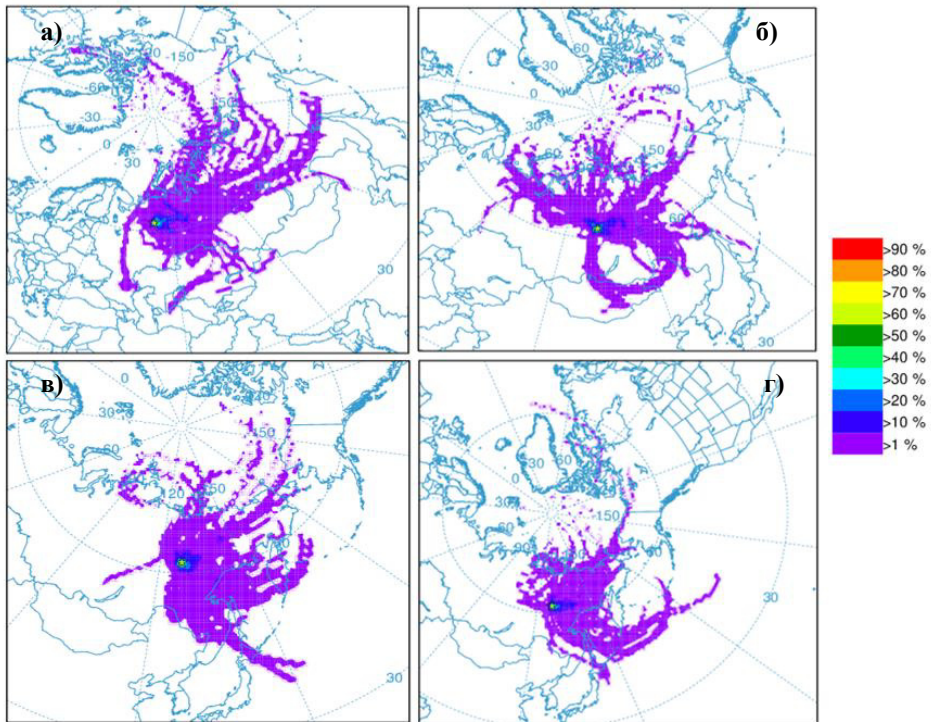


Рисунок 2. Карты 5-ти суточных вероятности переноса выброса для пожаров с наибольшим количеством траекторий, попадающих в Арктику

а) пожар в республике Коми (август, 2016 год); б) пожар в Красноярском крае (август, 2000 год); в) пожар в Якутии (август, 2003 год); г) пожар в Якутии (сентябрь, 2014 год).

Вероятность представлена в %. Расположение источника показано желтой звездой

Figure 2. Five days trajectories probability of particle transfer for fires with the largest number fell into the Arctic

а) the fire in Komi Republic (August, 2016), б) the fire in Krasnoyarskiy region (August, 2000), в) the fire in Yakutiya (August, 2003), г) the fire in Yakutiya (September, 2014).

Probability is presented in %. Location of the sources is shown by yellow star

При расположении источника в центральной части Красноярского края (рис. 2б), с вероятностью от 1 до 10% частица может пересечь территорию, покрытую морским льдом, и достигнуть побережья Аляски или севера Канады за 5 суток. Однако не исключено, что часть черного углерода может осесть на водную поверхность или поверхность морского льда и раньше, чем через 5 дней. Если расположить гипотетический источник черного углерода в Якутии (рис. 2в), то в августе, даже при самой благоприятной синоптической обстановке, большая часть траекторий проходит вдоль северного побережья России, не затрагивая районы вблизи северного полюса. Однако в течение нескольких дней (от 1 до 3 дней) августа 2004 года циркуляционные особенности позволяли частицам пересечь границу морского льда. В сентябре 2014 года (рис. 2г) из источника в Якутии траектории частиц попадали в Арктику, пересекали границу морского льда, проходили вдоль побережья Канады, и даже попадали к южным берегам Гренландии.

Проведенный выше анализ позволяет утверждать, что в августе и сентябре (наиболее опасных месяцах с точки зрения пожаров) за последние 16 лет

существовали циркуляционные предпосылки переноса частиц от гипотетических лесных пожаров на поверхность морского льда в Арктике. Вероятность прохождения частицы, выброшенной на севере России в зоне бореальной тайги, через районы Северного-Ледовитого океана, покрытые морским льдом, составляет 1-10%.

Высотное распределение облака выбросов черного углерода в процессе атмосферного переноса (рис. 3) показывает, что перенос содержащего черный углерод дыма в Арктику происходит на высотах от 2 до 6 км, т.е. выше пограничного слоя атмосферы. Аэрозольные частицы, находящиеся на данных высотах, имеют большее время жизни за счет менее интенсивного выведения из атмосферы и могут переноситься на более дальние расстояния. В слое от 0 до 3 км концентрация частиц черного углерода в первый день после пожара составляет не более 0.01 мг/м^3 (рис. 3б), а уже через два дня происходит значительное уменьшение концентрации черного углерода в слое до трех километров до 0.001 мг/м^3 (рис. 3в). Поэтому в данной работе не учитываются сложные физические процессы, происходящие с черным углеродом в приземном слое (Козлов и др., 2007, Козлов и др., 2010).

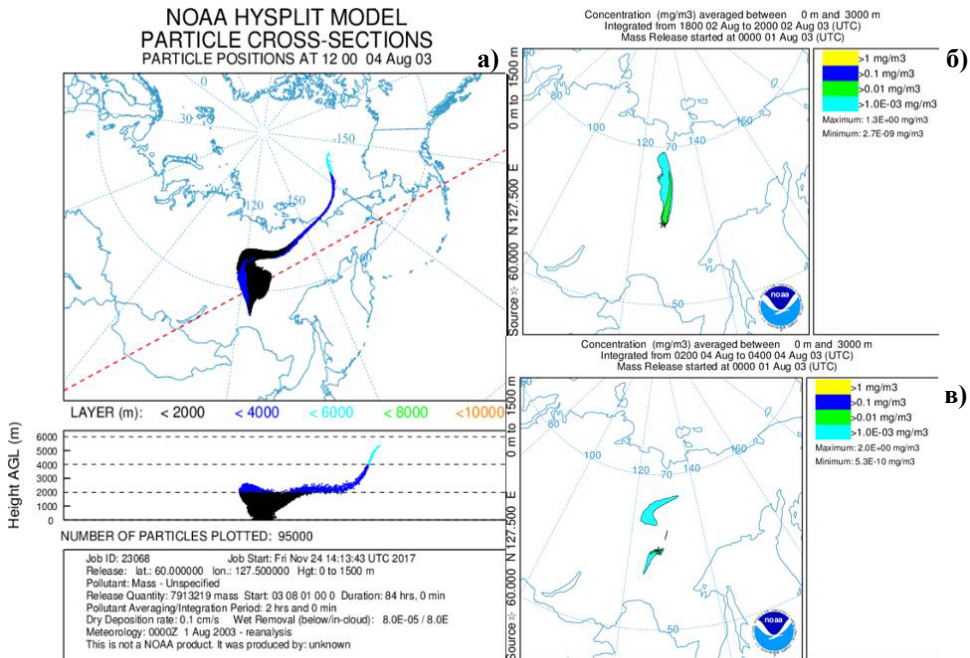


Рисунок 3. Высотное распределения облака переноса черного углерода от источника в Якутии по результатам модели HYSPLITE

- а) распределение выбросов черного углерода по высотам через 3 дня после выброса;
- б) концентрация черного углерода в слое от 0 до 3 км на следующий день после пожара;
- в) концентрация черного углерода в слое от 0 до 3 км через 3 дня после пожара.

Figure 3. Altitudinal distribution of an emission cloud transferring from a source in Yakutia according to the results of the HYSPLITE model

- а) altitudinal distribution of black carbon in 3 days after the emission;
- б) black carbon concentration in the layer from 0 to 3 km in 1 day after the fire;
- в) black carbon concentration in the layer from 0 to 3 km in 3 days after the fire

Результаты оценки климатического воздействия черного углерода

В работе рассмотрено несколько сценариев с различными источниками черного углерода. Также был запущен *базовый сценарий*, в котором источники ЧУ отсутствуют. В *первом сценарии* был запущен вариант со средними за последние 15 лет (2001-2015 гг.) значениями эмиссий черного углерода для августа. Для их расчета были использованы данные о распределении выбросов в Северном полушарии (рис. 4), представленные в глобальной базе данных по выбросам от лесных пожаров GFEDv2.1 (Randerson et al., 2013).

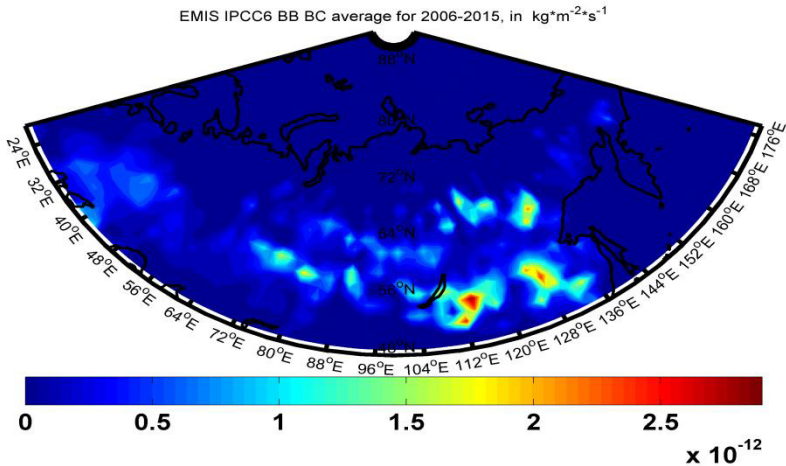


Рисунок 4. Средняя интенсивность выбросов в августе ($\text{кг} \times \text{м}^{-2} \times \text{с}^{-1}$) с 2006 по 2015 гг. по данным глобальной базы выбросов от лесных пожаров (GFEDv2.1)

Figure 3. The average emission intensity in August ($\text{kg} \times \text{m}^{-2} \times \text{s}^{-1}$) over 2006-2015 according to global forest fire emission database (GFEDv2.1)

Во *втором сценарии* за источник черного углерода принималась модельная ячейка с пожаром. Интенсивность и мощность выброса принималась на основании анализа данных о средних выбросах и средней интенсивности выбросов черного углерода от лесных пожаров в каждом из выбранных регионов. Исходя из конфигурации сетки модели ИВМ и карты лесов (рис. 1) для моделирования экстремального пожара в Якутии была выбрана ячейка с центром $60^\circ\text{с.ш.}; 127.5^\circ\text{в.д.}$, в Коми – $60^\circ\text{с.ш.}; 52.5^\circ\text{в.д.}$, в Красноярском крае – $60^\circ\text{с.ш.}; 102.5^\circ\text{в.д.}$

В данном эксперименте эмиссия чёрного углерода задаётся равномерной в столбе воздуха до высоты 850 гПа (1500 м). Считается, что поток гидрофобного чёрного углерода составляет 80%, а гидрофильного – 20% от всего потока чёрного углерода. Поток углерода для случая апокалиптического сценария пожара задаётся в ячейке, расположенной в Якутии, равным $1.42 \cdot 10^{-9} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$, в Красноярском крае – $2.59 \cdot 10^{-9} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$, в Коми – $2.7 \cdot 10^{-9} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$. Эмиссия чёрного углерода осуществляется в течении 1-12 августа 2004, причём временной интервал эмиссии 12 суток выбирался равным средней продолжительности лесного пожара. Всего в этом эксперименте в атмосферу выбрасывается $2.71 \cdot 10^7 \text{ кг}$ чёрного углерода. Суммарный выброс

черного углерода в каждой реализации распределяется равномерно на период 30 дней - с 1 по 30 августа.

В каждом сценарии модель интегрируется сроком на три месяца с 1 августа 2004 г по 31 октября 2004 г., проводится ансамбль расчётов, состоящий из 10 реализаций. Для каждой реализации проводится инициализация начальных данных, соответствующая 1 июля 2004 с немного возмущённым полем температуры воздуха. Далее проводится предварительный расчёт на 1 месяц с целью рандомизации модельных траекторий, относящимся к различным реализациям, и подготовки начальных данных соответствующих 1 августа 2004 г.

В работе было проведено исследование влияния черного углерода от лесных пожаров в Якутии и от пожаров всего Северного полушария на коротковолновый радиационный баланс поверхности в условиях ясного неба для арктической области, полностью или частично покрытой льдом (рис. 5). Результаты численных экспериментов модели климата ИВМ показали, что баланс коротковолновой радиации у поверхности для территорий, расположенных ближе всего к источнику черного углерода, (море Лаптевых), в месяц возникновения пожара в Якутии на 5% меньше, чем баланс коротковолновой радиации при отсутствии источников эмиссии черного углерода, и на 1.5-2% больше, чем при учете всех пожаров Северного полушария. Это говорит о существенном влиянии лесных пожаров в Якутии на сокращение приходящей коротковолновой радиации при условии возникновения синоптической ситуации с большой вероятностью переноса черного углерода в Арктику. Наличие в атмосферном столбе черного углерода приведет к тому, что альbedo системы поверхность-атмосфера в среднем уменьшится, что приведет к дополнительному нагреву, т.е. радиационный форсинг положительный.

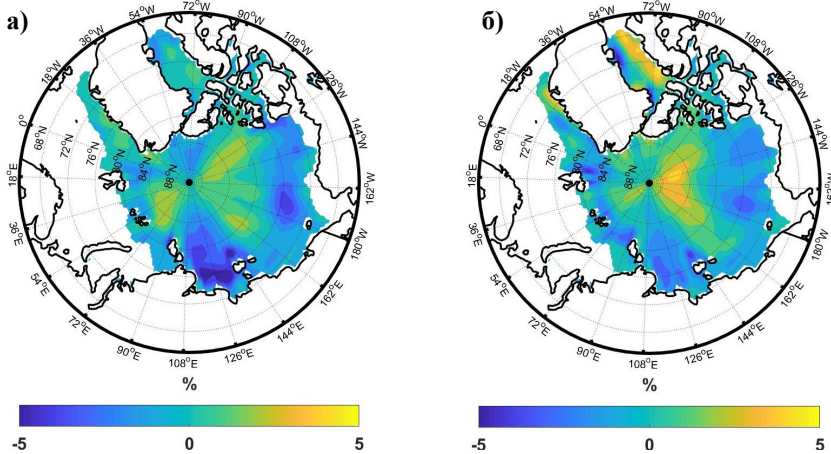


Рисунок 5. Различие баланса коротковолновой радиации для экспериментов с источником и без источника, август
а – Якутия, б – Северное полушарие

Figure 5. Difference in the short-wave radiation balance for experiments with a source and without a source, August
a - Yakutia, б - Northern Hemisphere

Аналогичное исследование было проведено и для альbedo в безоблачных условиях в Арктическом регионе, покрытом льдом, однако существенных раз-

личий между экспериментами с источником и без источника выявлено не было. Это связано с тем, что в данной работе изучалось влияние атмосферного ЧУ только на радиационные потоки в атмосфере. Исследование другого важного механизма влияния ЧУ на радиационные потоки в системе атмосфера-поверхность, связанного с изменением альbedo снежно-ледовой поверхности после осаждения ЧУ на эту поверхность, не являлось целью данной работы. Параметризация этого влияния в климатической модели является довольно сложной задачей, поскольку требует учета многих процессов влияющих на микрофизику снежных частиц и их перемешивание с частицами ЧУ, например, метелевого переноса. Исследование данного механизма требует дальнейшего изучения.

Вертикальное распределение выбросов черного углерода сильно зависит от источника пожара, времени года и стратификации атмосферы. Выбросы от лесных пожаров обычно попадают в атмосферу выше планетарного пограничного слоя, поэтому перенос дыма в среднем происходит на высотах от 2 до 5 км (Sharma et al., 2013), что подтверждается расчетами по модели HYSPLITE (рис. 3). Летом выбросы от лесных пожаров за счет неустойчивой стратификации, а также наличия конвективных облаков могут распространяться на высоты до 7 км (Paris et al., 2009). Следовательно, время жизни частиц черного углерода и расстояние, на которое они могут переместиться, увеличиваются.

Выводы

Результаты численных экспериментов модели ИВМ показали, что баланс коротковолновой радиации у поверхности для территорий, расположенных ближе всего к источнику черного углерода (море Лаптевых), в месяц возникновения пожара в Якутии на 5% меньше, чем баланс коротковолновой радиации при отсутствии источников эмиссии черного углерода, и на 1.5-2% больше, чем при учете всех пожаров Северного полушария. Это говорит о существенном влиянии лесных пожаров в Якутии на сокращение приходящей коротковолновой радиации при условии возникновения синоптической ситуации с большой вероятностью переноса черного углерода в Арктику. Что касается изменений альbedo, то существенных различий между экспериментами с источником и без источника выявлено не было. Это связано с текущей параметризацией альbedo поверхности лед-снег в модели ИВМ, не учитывающей влияние осажденного черного углерода на его величину.

Суммарное радиационное воздействие частиц черного углерода в результате прямого поглощения солнечной радиации, взаимодействия с облаками и их разогрева, а также изменения альbedo снега и льда оценивается от $0.64 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ (IPCC, 2013) до $1.1 (0.17-2.1) \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ (Bond et al., 2013). По результатам проведенных модельных экспериментов влияние черного углерода на баланс коротковолновой радиации от всех пожаров Северного полушария составляет $0.11 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ при облачных условиях и $0.21 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ при ясном небе. Получившиеся оценки несколько меньше, чем значения, приведенные в (IPCC, 2013; Bond et al., 2013) за счет того, что в этих работах учтены как антропогенные

источники черного углерода, так и природные, в то время как в нашей работе внимание сконцентрировано только на выбросах черного углерода при лесных пожарах. Результаты моделирования показывают, что роль выбросов черного углерода от пожаров на Арктический регион, покрытый льдом, незначительно.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 18-05-60183 - Процессы и последствия дальнего атмосферного переноса черного углерода и радионуклидов в Арктике).

Список литературы

Виноградова А.А., Смирнов Н.С., Коротков В.Н., Романовская А.А. 2015. Лесные пожары в Сибири и на Дальнем Востоке: эмиссии и атмосферный перенос черного углерода в Арктику – Оптика атмосферы и океана, т. 28, № 6, с. 512-520.

Виноградова А.А., Смирнов Н.С., Коротков В.Н. 2016. Аномальные пожары 2010 и 2012 гг. на территории России и поступление черного углерода в Арктику – Оптика атмосферы и океана, 29, № 6, с. 482-487.

Володин Е.М., Дианский Н.А., Гусев А.В. 2013. Воспроизведение и прогноз климатических изменений в XIX-XXI веках с помощью модели земной климатической системы ИВМ РАН. – Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, т. 49, № 4, с. 379-400.

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

Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ Рослесхоз). 2019. – Электронный ресурс. URL: https://nffc.aviales.ru/main_pages/index.shtml (дата обращения 20.11.2019).

Кароль И.Л., Киселев А.А., Генихович Е.Л., Чичерин С.С. 2013. Сокращение выбросов короткоживущих атмосферных примесей как альтернативная стратегия замедления изменений климата. – Изв. РАН. Сер. ФАО, т. 49, № 5, с. 503-522.

Романовская А.А., Имшенник Е.В., Карабань Р.Т., Смирнов Н.С., Коротков В.Н., Трунов А.А. 2016. Выбросы короткоживущих климатически активных веществ антропогенного происхождения на территории России за период с 2000 до 2013 год. – Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, т. XXVII, № 1, doi: 10.21513/0207-2564-2016-1-27-48.

Смирнов Н.С., Коротков В.Н., Романовская А.А. 2015. Выбросы черного углерода от природных пожаров на землях лесного фонда Российской Федерации в 2007-2012 гг. – Метеорология и гидрология, № 7, с. 5-17.

AMAP, 2015. Arctic Monitoring and Assessment Programme, Assessment 2015: Black carbon and ozone as Arctic climate forcers. – Oslo, 116 p.

Bond T.C., Doherty S.J., Fahey D.W., Forster P.M., Berntsen T., DeAngelo B.J., Flanner M.G., Ghan S., Kärcher B., Koch D., Kinne S., Kondo Y., Quinn P.K., Sarofim M.C., Schultz M.G., Schulz M., Venkataraman C., Zhang H., Zhang S., Bellouin N., Guttikunda S.K., Hopke P.K., Jacobson M.Z., Kaiser J.W., Klimont Z., Lohmann U., Schwarz J.P., Shindell D., Storelvmo T., Warren S.G., Zender C.S. 2013. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. – *J. Geoph. Res. (Atmospheres)*, vol. 118, pp. 5380-5552, doi:10.1002/jgrd.50171.

Buseck P.R., Adachi K., Gelencser A., Tompa E., Posfai M. 2012. Are black carbon and soot the same? – *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, vol. 12, pp. 24821-24846. Doi:10.5194/acpd-12-24821-2012.

Evans M., Kholod N., Kuklinski T., Denysenko A., Smith S.J., A. Staniszewski A., Hao W.M., Liu L., Bond T.C. 2017. Black carbon emissions in Russia: A critical review. – *Atmospheric Environment*, vol. 163, pp. 9-12. Doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.05.026.

Huang K., Fu J.S., Prikhodko V.Y., Storey J.M., Romanov A., Hodson E.L., Cresko J., Morozova I., Ignatieva Yu., Cabaniss J. 2015. Russian anthropogenic black carbon: Emission reconstruction and Arctic black carbon simulation. – *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 120, 21, pp. 11306-11333. Doi: 10.1002/2015JD023358.

IPCC, 2007. *IPCC Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* – /Ed. by Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. – Cambridge, Cambridge University Press, 1007 p.

IPCC, 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* – Ed. by Stocker T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley). – Cambridge, Cambridge University Press, 1535 p.

Koch D. et al. 2009. Evaluation of black carbon estimations in global aerosol models. – *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 9, pp. 9001-9026.

Lavoue D.C., Lioussé C., Cachier H., Stocks B.J., Goldammer J.G. 2000. Modelling of carbonaceous particles emitted by boreal and temperate wildfires at northern latitudes. – *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 105, pp. 26871-26890.

NCEP, 2019. National Centers for Environmental Prediction. – Available at: <http://www.ncep.noaa.gov/> (accessed 01.06.2019).

Paris J.D., Stohl A., Nedelec P., Arshinov M.Y., Panchenko M.V., Shmargunov V.P., Law K.S., Belan, Ciaïș P. 2009. Wildfire smoke in the Siberian Arctic in summer: source characterization and plume evolution from airborne measurements. – *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 9, pp. 9315-9327.

Randerson J.T., van der Werf G.R., Giglio L., Collatz G.J., Kasibhatla P.S. 2013. Global Fire Emissions Database, Version 2 (GFEDv2.1). Data set. Available online (<http://daac.ornl.gov/>) from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, USA. – Available at: <http://dx.doi.org/10.3334/ORNLDAAAC/849>.

Shindell D., Faluvegi G. 2009. Climate response to regional radiative forcing during the twentieth century. – *Nature Geoscience*, vol. 2, pp. 294-300. Doi:10.1038/ngeo473.

Sharma S., Ishizawa M., Chan D., Lavoué D., Andrews E., Eleftheriadis K., Maksyutov S. 2013. 16-year simulation of Arctic black carbon: Transport, source contribution, and sensitivity analysis on deposition. – *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 118, pp. 943-964. Doi:10.1029/2012JD017774.

Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D., Stunder B.J.B., Cohen M.D., Ngan F. 2015. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. – *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 96, pp. 2059-2077. – Available at: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1> <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>.

UNEP & WMO. 2011. Integrated Assessment of Black Carbon and Tropospheric Ozone. – UNON/Publishing Services Section/Nairobi, 285 p.

U.S. EPA, 2012. Report to Congress on Black Carbon. – US Environmental Protection Agency, Washington, DC. – Available at <http://www.epa.gov/blackcarbon/>.

Статья поступила в редакцию: 06.04.2020 г.

После переработки: 20.04.2020 г.

THE PROBABILITY OF TRANSFER TO THE ARCTIC OF SHORT-LIVED CLIMATE-FORMING AEROSOLS FROM MODEL FOREST FIRES IN RUSSIA AND THEIR POSSIBLE IMPACT ON CLIMATE

V.A. Ginzburg^{1,2)}, S.V. Kostrykin^{1,3,4)}, A.P. Revokatova^{1,5)}, A.G. Ryaboshapko, A.S. Pastukhova, V.N. Korotkov¹⁾, P.D. Polumieva¹⁾*

¹⁾ Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology,
20 B, Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russian Federation;
*corresponding author: veronika.ginzburg@gmail.com

²⁾ Institute of Geography RAS,
29, Staromonetny lane, 119017, Moscow, Russian Federation

³⁾ G.I Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS,
8, Gubkina str., 119333, Moscow, Russian Federation

⁴⁾ A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS,
3, Pizhevskiy lane, 119017, Moscow, Russian Federation

⁵⁾ Hydrometcentre of Roshydromet,
11-9, Bolshoy Predtechenskiy lane, Moscow, Russian Federation

Abstract. The aim of a study is to assess the probability of black carbon (BC) transfer from high-intensity model forest fires in the taiga zone, to determine the fields of concentrations and deposition of black carbon on the ice-snow surface, and to assess the black carbon contribution to climate change in the Arctic. Model regions with the highest probability of large forest fires (the Komi Republic, Krasnoyarsk Krai and the Republic of Sakha (Yakutia)) were selected based on the analysis of remote monitoring data. The analysis of the probability of a cloud of BC emissions from model fires transfer to the ice surface of the Arctic is performed using the HYSPLIT trajectory model. The probability of a particle emitted from the boreal taiga zone to traverse the ice-covered part of the Arctic Ocean is found to be between 1-10%. Effects of black carbon (the balance of short-wave radiation) on the Arctic climate were estimated on the basis of the INM RAS global climate model. According to the results of model experiments, the effect of black carbon on the balance of short-wave radiation from all model fires in the Northern Hemisphere is $0.11 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ under cloudy conditions and $0.21 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ in clear sky. The estimated effect on the short-wave radiation balance is 1.5-2% larger income compared to the scenario without emission sources. The simulation results showed that the effect of black carbon emissions from forest fires on the Arctic region covered with ice is negligible.

Keywords. Black carbon, Arctic, forest fires, aerosols, climate change.

References

Vinogradova A.A., Smirnov N.S., Korotkov V.N., Romanovskaya A.A. 2015. Lesnyye pozhary v Sibiri i na Dal'nem Vostoke: emissii i atmosferynyy perenos chernogo ugleroda v Arktiku [Forest fires in Siberia and the Far East: emissions

and atmospheric transport of black carbon to the Arctic]. *Optika atmosfery i okeana – Atmospheric and Oceanic Optics*, vol. 28, no. 6, pp. 512-520.

Vinogradova A.A., Smirnov N.S., Korotkov V.N. 2016. Anomal'nyye pozhary 2010 i 2012 gg. na territorii Rossii i postupleniye chernogo ugleroda v Arktiku [Anomalous fires of 2010 and 2012 in Russia and the entry of black carbon into the Arctic]. *Optika atmosfery i okeana – Atmospheric and Oceanic Optics*, vol. 29, no. 6, pp. 482-487.

Volodin E.M., Diansky N.A., Gusev A.V. 2013. Vosproizvedeniye i prognoz klimaticheskikh izmeneniy v XIX-XXI vekakh s pomoshch'yu modeli zemnoy klimaticheskoy sistemy IVM RAN [Reproduction and forecast of climatic changes in the XIX-XXI centuries using the model of the Earth's climate system of the IVM RAS]. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana – Atmospheric and Oceanic Physics*, vol. 49, no. 4, pp. 379-400.

Volodin E.M., Kostykin S.V. 2016. Aerazol'nyy blok v klimaticheskoy modeli IVM RAN [Aerosol block in the climate model of the INM RAS]. *Meteorologiya i gidrologiya – Meteorology and hydrology*, no. 8, pp. 5-17.

Informatsionnaya sistema distantsionnogo monitoringa Federal'nogo agentstva lesnogo khozyaystva (ISDM Rosleskhoz) [Remote Monitoring Information System of the Federal Forestry Agency (ISDM Rosleskhoz)]. 2019. URL: https://nffc.aviales.ru/main_pages/index.shtml (accessed 20.11.2019).

Karol I.L., Kiselev A.A., Genikhovich E.L., Chicherin S.S. 2013. Sokrashcheniye vybrosov korotkozhevushchikh atmosferykh primesey kak al'ternativnaya strategiya zamedleniya izmeneniy klimata [Reducing emissions of short-lived atmospheric pollutants as an alternative strategy for slowing climate change]. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana – Atmospheric and Oceanic Physics*, vol. 49, no. 5, pp. 503-522.

Romanovskaya A.A., Imshennik E.V., Karaban R.T., Smirnov N.S., Korotkov V.N., Trunov A.A. 2016. Vybrosy korotkozhevushchikh klimaticheskii aktivnykh veshchestv antropogennogo proiskhozhdeniya na territorii Rossii za period s 2000 do 2013 god [Emissions of short-lived climatically active substances of anthropogenic origin on the territory of Russia for the period from 2000 to 2013]. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem – Problems of Ecological Monitoring and Ecosystem Modelling*, vol. XXVII, no. 1, doi: 10.21513/0207-2564-2016-1-27-48.

Smirnov N.S., Korotkov V.N., Romanovskaya A.A. 2015. Vybrosy chernogo ugleroda ot prirodnykh pozharov na zemlyakh lesnogo fonda Rossiyskoy Federatsii v 2007-2012 gg. [Black carbon emissions from natural fires on the lands of the forest fund of the Russian Federation in 2007-2012]. *Meteorologiya i gidrologiya – Meteorology and hydrology*, no. 7, pp. 5-17.

AMAP, 2015. Arctic Monitoring and Assessment Programme, Assessment 2015: Black carbon and ozone as Arctic climate forcers. – Oslo, 116 p.

Bond T.C., Doherty S.J., Fahey D.W., Forster P.M., Berntsen T., DeAngelo B.J., Flanner M.G., Ghan S., Kärcher B., Koch D., Kinne S., Kondo Y., Quinn P.K., Sarofim M.C., Schultz M.G., Schulz M., Venkataraman C., Zhang H., Zhang S., Bellouin N., Guttikunda S.K., Hopke P.K., Jacobson M.Z., Kaiser J.W., Klimont Z., Lohmann U., Schwarz J.P., Shindell D., Storelvmo T., Warren S.G., Zender C.S. 2013. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. – *J. Geoph. Res. (Atmospheres)*, vol. 118, pp. 5380-5552, doi:10.1002/jgrd.50171.

Buseck P.R., Adachi K., Gelencser A., Tompa E., Posfai M. 2012. Are black carbon and soot the same? – *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, vol. 12, pp. 24821-24846. Doi:10.5194/acpd-12-24821-2012.

Evans M., Kholod N., Kuklinski T., Denysenko A., Smith S.J., A. Staniszewski A., Hao W.M., Liu L., Bond T.C. 2017. Black carbon emissions in Russia: A critical review. – *Atmospheric Environment*, vol. 163, pp. 9-12. Doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.05.026.

Huang K., Fu J.S., Prikhodko V.Y., Storey J.M., Romanov A., Hodson E.L., Cresko J., Morozova I., Ignatieva Yu., Cabaniss J. 2015. Russian anthropogenic black carbon: Emission reconstruction and Arctic black carbon simulation. – *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 120, 21, pp. 11306-11333. Doi: 10.1002/2015JD023358.

IPCC , 2007. IPCC Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – /Ed. by Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. – Cambridge, Cambridge University Press.

IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – Ed. by Stocker T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley). – Cambridge, Cambridge University Press, 1535 p.

Koch et al. 2009. Evaluation of black carbon estimations in global aerosol models. – *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 9, pp. 9001-9026.

Lavoue D.C., Liousse C., Cachier H., Stocks B.J., Goldammer J.G. 2000. Modelling of carbonaceous particles emitted by boreal and temperate wildfires at northern latitudes. – *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 105, pp. 26871-26890.

NCEP, 2019. National Centers for Environmental Prediction. – Available at: <http://www.ncep.noaa.gov/> (accessed 01.06.2019).

Paris J.D., Stohl A., Nedelec P., Arshinov M.Y., Panchenko M.V., Shmargunov V.P., Law K.S., Belan, Ciaia P. 2009. Wildfire smoke in the Siberian Arctic in summer: source characterization and plume evolution from airborne measurements. – *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 9, pp. 9315-9327.

Randerson J.T., van der Werf G.R., Giglio L., Collatz G.J., Kasibhatla P.S. 2013. Global Fire Emissions Database, Version 2 (GFEDv2.1). Data set. Available online (<http://daac.ornl.gov/>) from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, USA. – Available at: <http://dx.doi.org/10.3334/ORNLDAAAC/849>.

Shindell D., Faluvegi G. 2009. Climate response to regional radiative forcing during the twentieth century. – *Nature Geoscience*, vol. 2, pp. 294-300. Doi:10.1038/ngeo473.

Sharma S., Ishizawa M., Chan D., Lavoué D., Andrews E., Eleftheriadis K., Maksyutov S. 2013. 16-year simulation of Arctic black carbon: Transport, source contribution, and sensitivity analysis on deposition. – *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 118, pp. 943-964. Doi:10.1029/2012JD017774.

Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D., Stunder B.J.B., Cohen M.D., Ngan F. 2015. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. – *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 96, pp. 2059-2077. – Available at: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1> <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>.

UNEP & WMO. 2011. Integrated Assessment of Black Carbon and Tropospheric Ozone. – UNON/Publishing Services Section/Nairobi, 285 p.

U.S. EPA, 2012. Report to Congress on Black Carbon. – US Environmental Protection Agency, Washington, DC. – Available at <http://www.epa.gov/blackcarbon/>.