

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551.510.42

Применение модельного комплекса CHIMERE-WRF для изучения радиационных воздействий сибирского дымового аэрозоля в Восточной Арктике

И.Б. Коновалов^{✉1}, Н.А. Головушкин¹, Т.Б. Журавлева²,
И.М. Насртдинов², В.Н. Ужегов², М. Beekmann^{3*}

¹Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

³Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques
UMR 7583, CNRS, Faculte Sci. & Tech.,
61 Ave. General de Gaulle, Creteil Cedex, 94010 France

Поступила в редакцию 15.09.2022 г.;
после доработки 25.10.2022 г.;
принята к печати 28.11.2022 г.

Описана вычислительная технология для изучения эффектов аэрозольно-радиационного взаимодействия и получения региональных оценок прямого (ПРЭ) и полупрямого (ППРЭ) радиационных эффектов дымового аэрозоля на основе расчетов с использованием химико-транспортной модели CHIMERE, сопряженной с метеорологической моделью WRF. Предложенная технология применена для численного исследования радиационных воздействий сибирских дымов в Восточной Арктике в период 16–31 июля 2016 г. Результаты модельных расчетов показывают, что в указанное время сибирские дымы в целом оказывали значительное охлаждающее воздействие на атмосферу в Восточной Арктике за счет ПРЭ, величина которого на верхней границе атмосферы составляла в среднем $-6,0 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$, будучи минимальной над снежно-ледовым покровом океана ($-1,2 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$). Обнаружено, что вклад ПРЭ сибирского дымового аэрозоля в радиационный баланс арктической атмосферы в определенной мере компенсируется за счет ППРЭ, который в среднем является положительным ($2,0 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$). ППРЭ формируется при многочасовом воздействии аэрозоля на метеорологические процессы и играет наиболее важную роль над снежно-ледовыми арктическими поверхностями, где он превышает ПРЭ по абсолютной величине. Показано, что формирование ППРЭ сибирских дымов в выполненных численных экспериментах преимущественно обусловлено рассеянием (а не поглощением) излучения аэрозольными частицами.

Ключевые слова: аэрозоль, дым, химико-транспортная модель, аэрозольно-радиационное взаимодействие; aerosol, smoke, chemistry-transport model, aerosol-radiation interaction.

Введение

Атмосферный аэрозоль вносит существенный вклад в радиационный баланс атмосферы в Арктике, тем самым влияя на быстрые климатические изменения в этом регионе [1]. Аэрозоль воздействует на потоки излучения в общем случае посредством различных по своей природе радиационных эффектов:

— аэрозольно-радиационного взаимодействия (АРВ), включающего в себя прямой радиационный эффект (ПРЭ) [2], который обусловлен непосредственно поглощением и рассеянием излучения частицами аэрозоля, и полупрямой радиационный эффект (ППРЭ) [3], который развивается в результате воздействия ПРЭ на термическую структуру атмосферы и облачность;

— аэрозольно-облачного взаимодействия [4], которое связано с влиянием ядер конденсации на облакообразование и динамику облачности;

— радиационного эффекта уменьшения альбедо снежно-ледовых поверхностей вследствие осаждения на них поглощающих компонентов аэрозоля — прежде всего черного и коричневого углерода [5].

* Игорь Борисович Коновалов (konov@ipfran.ru); Николай Александрович Головушкин (golovushkin@ipfran.ru); Татьяна Борисовна Журавлева (ztb@iao.ru); Ильмир Мансурович Насртдинов (wizard@iao.ru); Виктор Николаевич Ужегов (uzhegov@iao.ru); Matthias Beekmann (beekmann@lisa.ipsl.fr).

Известно, что один из основных источников аэрозоля в Арктике в теплый период года — ландшафтные пожары в Северной Евразии, в особенности мощные пожары в Сибири [6]. Однако в отличие от радиационных и климатических эффектов антропогенного аэрозоля, которые являются предметом многочисленных исследований, аналогичные эффекты дымового аэрозоля (ДА) остаются малоизученными. Среди исследований радиационных эффектов ДА в Арктике можно отметить те, в которых были получены локальные оценки ПРЭ дымового аэрозоля на основе данных измерений [7–9]. В работе [1], выполненной с использованием нескольких глобальных химико-транспортных моделей (ХТМ), были оценены различные радиационные эффекты как антропогенного аэрозоля, так и дымов в Арктике, причем отдельно рассматривались источники из нескольких выделенных регионов Северного полушария. Некоторые модельные оценки радиационных эффектов ДА были опубликованы ранее [10–14] в качестве неосновной части результатов исследований АРВ в глобальном масштабе.

Большие различия между величинами радиационных эффектов ДА в Арктике, полученными на основе различных моделей в рамках ансамблевых численных экспериментов [1, 12], указывают на высокие неопределенности модельных оценок. Эти неопределенности, в свою очередь, обусловлены известными неточностями имеющихся модельных представлений источников [6, 14, 15], атмосферных трансформаций и оптических свойств ДА [16–19].

Один из перспективных подходов к изучению многочисленных факторов, определяющих оптические и радиационные свойства ДА и ответственных в конечном счете за неопределенности модельных оценок его радиационных эффектов в условиях конкретной изучаемой территории, основан на применении региональных трехмерных моделей, в которых совокупность метеорологических и химических процессов в нижней атмосфере учитывается с высокой степенью детальности, не присущей глобальным и климатическим моделям. В рамках указанного подхода в ряде исследований применялась метеорологическая химическая модель WRF-CHEM [20–22], а также модельный комплекс на основе ХТМ CHIMERE, сопряженной с моделью WRF [15–17, 23]. Важной особенностью модели WRF-CHEM является «онлайнный» способ расчета переноса и химических трансформаций аэрозолей и газов, в рамках которого эти процессы вычисляются одновременно с метеорологическими характеристиками и влияют на них посредством возмущений радиационных потоков и (или) концентраций ядер конденсации. Эта особенность затрудняет применение WRF-CHEM для получения отдельных оценок ПРЭ и ППРЭ аэрозоля, поскольку рассчитываемые в онлайн-режиме значения потоков излучения определяются одновременно обоими эффектами АРВ.

С другой стороны, ХТМ CHIMERE изначально была предназначена для так называемых «оф-

лайнных» расчетов, при которых химические процессы и перенос вычисляются на основе заранее заданных характеристик метеорологических процессов [24]. Вследствие того, что вычисления радиационных потоков в самой CHIMERE не предусмотрены, ее применение совместно с WRF в офлайн-режиме не позволяет вычислять какие-либо радиационные эффекты аэрозоля. Однако изучение радиационных эффектов аэрозолей различных типов с использованием CHIMERE стало возможным после того, как была разработана новая версия этой модели, позволяющая выполнять как онлайн-режиме, так и офлайн-режиме расчеты переноса и трансформаций аэрозоля [25–27].

Цель данной работы — изучение возможностей применения модельного комплекса CHIMERE-WRF для исследования АРВ сибирского ДА в Восточной Арктике и получения отдельных оценок ПРЭ и ППРЭ. Другие радиационные эффекты ДА (включая эффекты аэрозольно-облачного взаимодействия) в настоящей работе не рассматриваются.

В основе выполненного исследования лежит разработка и последующее применение оригинальной методики (вычислительной технологии) для расчета ПРЭ и ППРЭ. В отличие от подобных методик, примененных ранее в исследованиях на базе WRF-CHEM [20, 21], мы предлагаем не использовать допущение о том, что возникновение ППРЭ ДА однозначно связано с наличием черного углерода (или других поглощающих компонент) в его составе. Отказ от этого допущения позволяет оценить вклад в ППРЭ не только поглощения, но и рассеяния излучения аэрозольными частицами. Численные эксперименты, проведенные в рамках данной работы, охватывают сравнительно короткий период (вторую половину июля 2016 г.), когда в Западной Сибири происходили мощные лесные пожары.

1. Вычислительная технология для оценки ПРЭ и ППРЭ дымового аэрозоля

Исходной задачей предлагаемой вычислительной технологии является оценка эффекта АРВ (Φ_{ARI}) на верхней и нижней границах атмосферы (аббревиатура ARI обозначает термин aerosol-radiation interaction и является полным аналогом аббревиатуры АРВ). Полагается, что величины Φ_{ARI} в данной модельной ячейке и в данный момент времени связаны с рассчитываемыми моделью радиационными потоками на верхней или нижней границах атмосферы следующим общим соотношением [19]:

$$\Phi_{ARI} = F^{\downarrow all} - F^{\downarrow bg} - (F^{\uparrow all} - F^{\uparrow bg}), \quad (1)$$

где F — суммарные потоки излучения в УФ-, видимом и тепловом диапазонах спектра на рассматриваемом уровне атмосферы; индекс all обозначает потоки в расчете, в котором содержание атмосферного аэрозоля определяется всеми основными источниками, включая источники ДА (т.е. ландшафтные

пожары), bg – потоки в расчете, в котором источники ДА отсутствуют; стрелки обозначают направление распространения потоков.

Важно отметить, что в общем случае разности потоков F^{all} и F^{bg} определяются не только рассеянием и поглощением излучения частицами ДА (т.е. не только ПРЭ), но и различиями в других параметрах атмосферы, влияющих на распространение в ней солнечного излучения. Те из различий между F^{all} и F^{bg} , которые возникают вследствие перераспределения энергии солнечного излучения внутри атмосферы частицами ДА, формируют ППРЭ [3], представляющий особый интерес в контексте настоящей работы. Иными словами, Φ_{ARI} включает в себя как ПРЭ, так и ППРЭ ДА, величины которых обозначены ниже как Φ_d и Φ_{sd} (d – direct; sd – semi-direct). В отличие от ПРЭ, который возникает или исчезает в данной точке атмосферы практически мгновенно при появлении или исчезновении в ней дымового шлейфа, формирование ППРЭ по определению носит продолжительный (накопительный) характер. Исходя из этих соображений, в рамках данной работы полагается, что оценка Φ_{ARI} является – наряду с оценкой Φ_{sd} – функцией вычислительного параметра τ , характеризующего учитываемую в численных экспериментах продолжительность приспособления атмосферы к радиационному воздействию ДА:

$$\Phi_{ARI}(\tau) = \Phi_d + \Phi_{sd}(\tau). \quad (2)$$

На основе уравнения (2) оценка Φ_d может быть получена как значение Φ_{ARI} при $\tau = 0$:

$$\Phi_d = \Phi_{ARI}(0), \quad (3)$$

оценка $\Phi_{sd}(\tau)$ – как разность $\Phi_{ARI}(\tau) - \Phi_{ARI}(0)$.

Поскольку все величины, входящие в уравнения (2) и (3), варьируются во времени и пространстве (будучи зависимыми от пространственно-временных полей источников аэрозоля и метеорологических параметров), полезно выполнить усреднение их значений за достаточно большой период времени (порядка недели и более) и по достаточно большому региону (с характерными размерами от тысячи километров). В данной работе предполагается, что усредненные таким образом величины Φ_{ARI} и Φ_{sd} по мере увеличения τ относительно быстро (на масштабе десятков часов) приближаются к некоторым предельным значениям, и потому их разумные оценки, характеризующие рассматриваемые радиационные эффекты в реальной атмосфере, могут быть получены при заданных конечных значениях τ . Справедливость указанного предположения подтверждается (по крайней мере, отчасти) результатами численных экспериментов, представленными в разд. 3.

Значения радиационных потоков рассчитываются WRF, являясь ее стандартными выходными параметрами. С целью учета изменений этих значе-

ний в результате аэрозольно-радиационного взаимодействия в онлайн-режиме из CHIMERE в WRF на каждом шаге интегрирования (обычно равном 10 мин) и для каждой ячейки трехмерной сетки передаются значения ключевых аэрозольных оптических характеристик, включая аэрозольную оптическую толщину (АОТ), альbedo однократного рассеяния (АОР) и фактор асимметрии (ФА), для ряда длин волн, охватывающих УФ-, видимый и ближний ИК-диапазоны [27]. При этом офлайн-режим позволяет рассчитать изменения состава атмосферы вследствие отключения источников ДА при фиксированных метеорологических параметрах, что необходимо для оценки ПРЭ.

Таким образом, разработанная вычислительная технология для расчета ПРЭ и ППРЭ ДА включает в себя комбинацию онлайн- и офлайн-расчетов, которые могут быть разделены на две стадии.

На первой (подготовительной) стадии (рис. 1, а) выполняется серия последовательных 6-часовых расчетов с WRF, охватывающих рассматриваемый период (который в нашей работе равен 16 сут), с использованием «холодного» старта (т.е. с использованием глобальных данных в качестве начальных условий) для каждого из последовательных расчетов. Шестичасовой интервал равен временному шагу в используемых в расчетах глобальных данных реанализа и в принципе может быть сокращен. На этой же стадии параллельно выполняется серия офлайн-расчетов с CHIMERE (с метеорологическими данными из WRF) с учетом и без учета эмиссий от пожаров. Серия расчетов CHIMERE стартует с глобальных (климатологических) начальных условий; каждый последующий 6-часовой расчет использует результаты предыдущего в качестве начальных условий.

На второй стадии выполняется серия онлайн-расчетов (рис. 1, б), учитывающих АРВ и призванных обеспечить оценку ПРЭ и ППРЭ ДА. Как и на предыдущей стадии, каждый из расчетов WRF стартует с заданных глобальных начальных условий. Параллельно выполняемые расчеты CHIMERE инициализируются на основе концентраций газовых и аэрозольных компонентов, вычисленных на первой стадии. Радиационные потоки в самом начале каждого из 6-часовых интервалов рассчитываются с учетом и без учета ДА практически при одном и том же состоянии атмосферы и тем самым характеризуют ПРЭ. В то же время продолжение этих расчетов в течение интервала τ позволяет охарактеризовать ППРЭ дымов (как функцию τ).

Действительно, различие между метеорологическими параметрами в рассматриваемых парных онлайн-расчетах, стартующих с одних и тех же начальных (метеорологических) условий с учетом и без учета источников ДА, определяется исключительно обратным влиянием дымового аэрозоля на метеорологические процессы. Для каждого момента времени и в каждой модельной ячейке эти

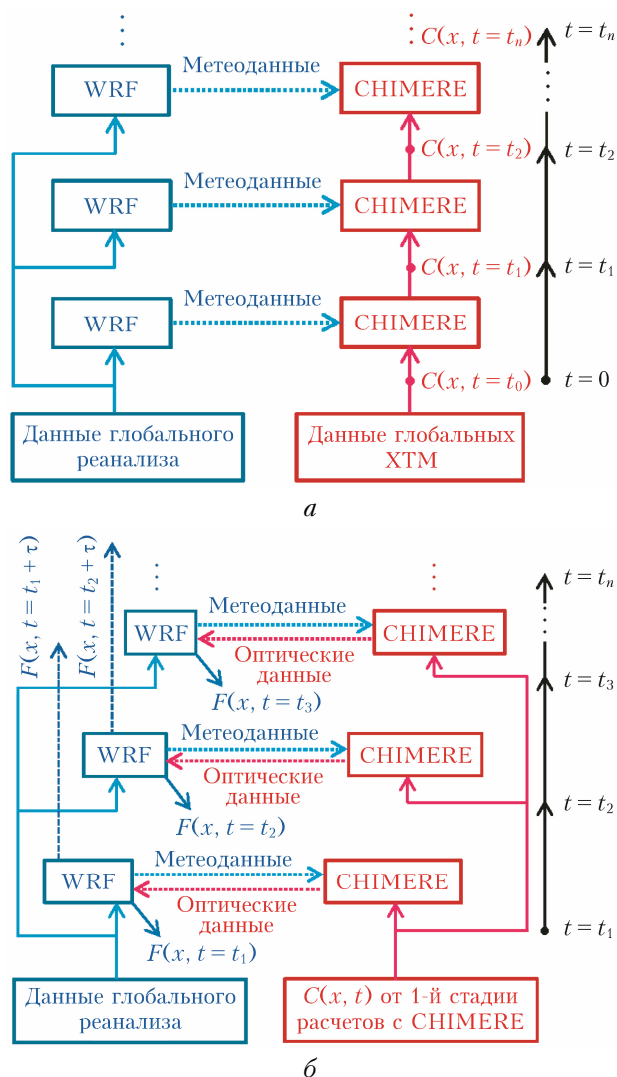


Рис. 1. Схематическое представление вычислительной технологии для получения оценок ПРЭ и ППРЭ ДА на основе расчетов с помощью моделей CHIMERE и WRF: *а* – первая (офлайн) стадия расчетов, результатом которой являются концентрации C рассматриваемых примесей как функции координат трехмерного пространства x и времени t ; *б* – вторая (онлайн) стадия расчетов, результатом которой являются пространственно-временные поля радиационных потоков $F(x, t)$ (см. цветной рисунок на сайте iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.02)

различия в общем случае имеют стохастический характер, отражающий неустойчивости и хаотичность, присущие атмосферным метеорологическим процессам. Однако усреднение результатов таких расчетов во времени и пространстве позволяет выделить устойчивую тенденцию в различиях значений радиационных потоков и тем самым оценить ППРЭ ДА.

Указанные расчеты на обеих стадиях выполняются как с учетом, так и без учета эмиссий аэрозольных и газовых примесей от сибирских пожаров. Интервал между последовательными запусками модели ($t_{i+1} - t_i$) в данной работе равен 6 ч. Максимальный период онлайн-расчетов (τ) в настоящей работе составляет 48 ч.

Вычисленные к концу каждого из онлайн-расчетов значения радиационных потоков используются для оценки Φ_{ARI} согласно уравнению (1). Оценки Φ_d и Φ_{sd} вычисляются на основе уравнений (2) и (3). Полученные для 6-часовых отсчетов оценки усредняются за весь рассматриваемый период, а также (при необходимости) по рассматриваемому региону.

Отметим, что если бы ПРЭ был рассчитан точно, то неопределенности оценок ППРЭ были бы связаны прежде всего с ошибками переноса дымовых шлейфов вследствие ошибок метеорологического прогноза, выполняемого в рамках онлайн-расчетов. Эти неопределенности, вероятно, возрастают в ситуациях с высокой пространственно-временной изменчивостью плотности дымов, но даже в таких случаях снижению неопределенности финальных оценок радиационных эффектов способствует упомянутая выше процедура усреднения исходных оценок по времени и пространству.

При использовании комплекса CHIMERE-WRF численные оценки Φ_{ARI} могут быть получены альтернативным образом непосредственно на основе последовательных онлайн-расчетов, аналогичных офлайн-расчетам на первой стадии описанной технологии. В таком случае каждый из последующих запусков WRF должен инициализироваться при использовании рассчитанных метеорологических данных из предыдущего запуска, а для того, чтобы полученные для длительного периода метеорологические данные не слишком отклонялись от данных реанализа, необходимо использовать предусмотренную в WRF процедуру спектрального наджинга (nudging) [28]. Однако такой способ организации расчетов не позволяет получить отдельные оценки ПРЭ и ППРЭ (что является целью представленной выше технологии), а оценки Φ_{ARI} оказываются зависящими от параметров наджинга. Более детальное рассмотрение указанного альтернативного способа получения оценок эффекта АРВ выходит за рамки настоящей работы.

2. Численные эксперименты

Описанная выше вычислительная технология была применена в численных экспериментах, нацеленных на получение оценок радиационных эффектов сибирского ДА для периода 16–31 июля 2016 г. В это время в Западной Сибири произошли крупные лесные пожары, вызвавшие задымление на масштабах тысяч километров [17, 29]. В расчетах в основном использовались типичные опции и параметризации, рекомендованные разработчиками CHIMERE и подробно описанные ими в обзорных статьях [24, 27], а также в документации модели (<https://www.lmd.polytechnique.fr/chimere/docs/>). Ниже представлено краткое описание конфигурации выполненных расчетов и указан ряд ее особенностей, которые имеют существенное значение в контексте настоящего исследования.

Расчеты были сделаны на общей для CHIMERE и WRF горизонтальной сетке с разрешением 90 км²,

охватывающей, кроме рассматриваемого в данной работе региона Восточной Арктики (т.е. региона, простирающегося в Восточном полушарии севернее 66,5° с.ш.), всю Европу и большую часть Азии (рис. 2). Такой широкий охват позволяет учесть в расчетах все основные источники загрязнения

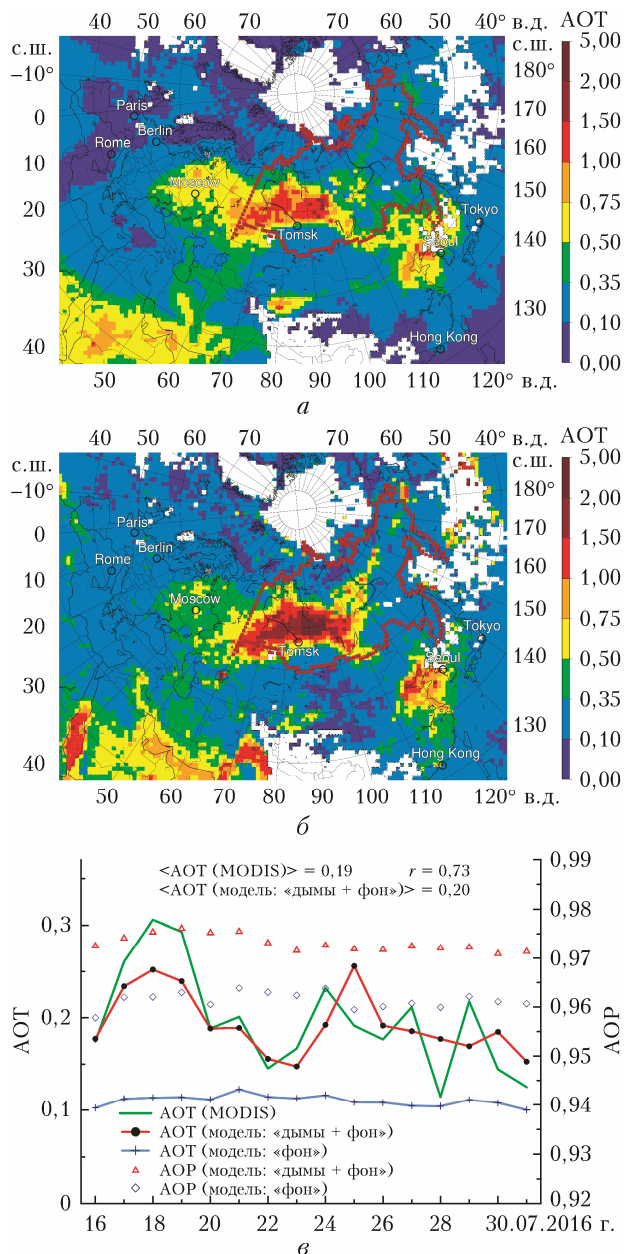


Рис. 2. Усредненные во времени (16–31 июля 2016 г.) пространственные распределения AOT (550 нм) согласно модельным расчетам (а) и спутниковым измерениями инструментами MODIS (б); временные серии рассчитанных (как с учетом, так и без учета сибирских пожаров) и измеренных значений AOT, усредненные по Восточной Арктике, и средние взвешенные значения AOP (550 нм) в вертикальном столбе аэрозоля (в). На фрагментах (а) и (б) выделен Сибирский регион, для которого оптимизировались значения эмиссий ДА (см. цветной рисунок на сайте iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.02); r – коэффициент корреляции между измеренными и рассчитанными значениями AOT

атмосферы в Восточной Арктике. В вертикальном направлении расчетные сетки CHIMERE и WRF включают в себя соответственно 15 и 33 уровня, самые верхние из которых соответствуют давлению, равному 200 и 50 гПа. В численных экспериментах одновременно рассчитывались массовые концентрации частиц дымового, антропогенного, биогенного, минерального и морского аэрозолей. Частицы аэрозоля всех типов были распределены по 10 диапазонам диаметров от 10 нм до 40 мкм. Динамика массовой концентрации аэрозольных частиц в каждом из диапазонов определялась эмиссиями первичного аэрозоля, адвективным и турбулентным переносом, коагуляцией, сухим и влажным осаждением, массообменом в системе «газ – частицы», а также газофазными окислительными реакциями, приводящими к образованию вещества вторичных органического и неорганического аэрозолей. Концентрации окислителей (ОН, NO₃, O₃) определялись путем расчета концентраций 59 газовых примесей, учитываемых в рамках упрощенного химического механизма MELCHIOR2.

Ввиду неизбежных больших неопределенностей, присущих известным способам описания процессов эволюции органической компоненты дымового аэрозоля [16–18], и с целью упрощения интерпретации результатов в данной работе было использовано одно из простейших модельных представлений органического аэрозоля (ОА) из предусмотренных в стандартном дистрибутиве CHIMERE, а именно представление [30], соответствующее в модели значению конфигурационного параметра $soatur = 2$. Согласно [30] первичный ОА состоит из нелетучих органических соединений, а вторичный аэрозоль образуется в результате одноступенчатых реакций нескольких газообразных предшественников (толуола, тетраметилбензидина, *n*-бутана и ксилола) с гидроксил-радикалом (ОН), и его компоненты обладают низкой летучестью, которой при типичных атмосферных условиях в нижней атмосфере можно пренебречь. Это представление, вероятно, сильно занижает скорость образования вторичного ОА в начальный период (10–15 ч) атмосферной эволюции дымов [16, 19]. Однако поскольку в течение первых часов эволюции сибирские дымов едва ли успевают достичь Арктики, влияние вторичного ОА на оценки радиационных эффектов ДА возможно учесть путем увеличения эмиссий ОА от сибирских пожаров. Отметим, что типичный «возраст» ДА в Арктике составляет, согласно оценкам, сделанным в рамках расчетов на основе «трассерного» анализа [17], двое суток и более.

Следуя ранее разработанной методике [15], к «стандартным» (см. ниже) эмиссиям ОА и черного углерода от сибирских пожаров были приложены постоянные корректирующие факторы, соответственно, f_{OA} и f_{BC} . Фактор $f_{OA} = 2,2$ удовлетворяет следующему условию:

$$\left| \langle AOT^m \rangle - \langle AOT^o \rangle \right| \langle AOT^o \rangle^{-1} < \epsilon, \quad (4)$$

где AOT^m и AOT^o – рассчитанные и наблюдаемые значения АОТ на 550 нм, угловые скобки обозначают усреднение по Восточной Арктике и анализируемому периоду, ϵ – малое число, которое было выбрано равным 0,03. В качестве наблюдаемых значений АОТ использовались спутниковые данные, восстановленные из измерений аэрозоля приборами MODIS [31]. Исходные данные MODIS второго уровня были обработаны и переведены на модельную сетку, как описано в предшествующих работах с использованием аналогичных данных [15–17]. Оценка значения $f_{BC} = 1,5$ была получена на основе отношения сибирских дымовых эмиссий черного и органического углерода, которое было оптимизировано ранее [15] в результате анализа данных спутниковых измерений и трехмерного моделирования с помощью CHIMERE, причем с использованием того же упрощенного представления ОА, что и в настоящей работе. Выполнение условия (4) достигается путем варьирования f_{OA} (и линейно связанного с ним f_{BC}) в ходе итерационного процесса [15], который в рассматриваемой ситуации быстро сходится благодаря тому, что вклад органического аэрозоля в AOT^m в среднем является доминирующим (> 90%).

На основе вычисленных массовых концентраций аэрозольных примесей и заданных значений их комплексных показателей преломления с использованием теории Ми в рамках CHIMERE рассчитывались оптические свойства аэрозоля (АОТ, АОР и ФА). С целью учета поглощения солнечного излучения органической компонентой ДА, т.е. коричневым углеродом, полагалось, что мнимая часть показателя преломления k всех модельных компонент ОА в дымах от сибирских пожаров на данной длине волны λ равняется одной и той же постоянной величине $k_{OA}(\lambda)$ (которая зависит от λ степенным образом в УФ- и видимом диапазонах длин волн) и равна нулю в ИК-области спектра. Исходя из результатов анализа данных дистанционного зондирования дымовых шлейфов от сибирских пожаров на станциях сети AERONET [32] и лабораторных измерений оптических свойств дымов [33, 34], имеем: $k_{OA}(440 \text{ нм}) = 0,0023$, а показатель степенной зависимости $k_{OA}(\lambda)$ равен $-4,0$. Вычисленное согласно этой зависимости значение $k_{OA}(388 \text{ нм}) = 0,0038$ согласуется с результатами анализа данных спутниковых измерений сибирских дымовых шлейфов, находившихся в освещенной атмосфере более 20 ч [35].

«Стандартные» (см. выше) эмиссии газовых и аэрозольных примесей атмосферы от пожаров были заданы в каждой ячейке модельной сетки с почасовым разрешением при использовании глобальной базы данных CAMS-GFAS [36]. Указанная база объединяет оценки эмиссий, полученные на основе спутниковых измерений мощности излучения от пожаров [37]. Почасовые значения антропогенных эмиссий аэрозольных и газовых примесей были рассчитаны по данным глобальной инвентаризации CAMS [38]. Эмиссии биогенного, мине-

рального и морского аэрозолей рассчитывались непосредственно в CHIMERE с использованием параметризаций и баз данных, описание и информация об апробации которых приведены в модельной документации и обзорных статьях [24, 27].

Полный период выполненных расчетов – с 1 по 31 июля 2016 г., при этом первые 15 дней рассматривались в качестве переходного периода и были исключены из дальнейшего анализа. В качестве начальных и граничных условий для концентраций газовых веществ и аэрозолей использовались данные климатологических расчетов с помощью глобальной модели LMDz4_INCA3, которые являются частью дистрибутива CHIMERE. Начальные и граничные условия для метеорологических параметров были заданы на основе глобальных данных финального реанализа NCEP (<https://rda.ucar.edu/>).

Расчеты выполнялись в соответствии с описанной в разд. 1 вычислительной технологией как с учетом, так и без учета эмиссий от сибирских пожаров. Кроме того, был выполнен тестовый расчет, в котором ДА моделировался как непоглощающий ($AOP = 1$) при тех же эмиссиях первичного ОА и газовых примесей.

Рассчитанные значения АОТ сопоставлены с данными спутниковых измерений на рис. 2. Можно отметить, в частности, что на пространственных распределениях как рассчитанных, так и измеренных значений АОТ (см. рис. 2, а, б) выделяется область повышенных АОТ в Западной Сибири и на европейской территории России, возникновение которой, как было показано ранее в [17], есть результат сибирских пожаров. Модель несколько занижает АОТ в Западной Сибири, но тем не менее в целом они выглядят реалистично. Модель адекватно воспроизводит средний уровень и значительную часть временной изменчивости восстановленных значений АОТ в Восточной Арктике (см. рис. 2, в). Хотя валидация модельных расчетов АОР выходит за рамки данной работы, рассчитанные значения этой важной характеристики (см. рис. 2, в) относительно высокие ($\sim 0,91$ – $0,99$), типичные для бореальных дымов [32, 39].

3. Результаты численных экспериментов

В результате модельных расчетов в соответствии с предложенной вычислительной технологией (см. разд. 1) были получены оценки прямого и полупрямого эффектов (Φ_d и Φ_{sd}), а также суммарного эффекта АРВ (Φ_{ARI}) сибирского дымового аэрозоля в каждой ячейке модельной сетки за 16–31 июля с учетом потоков излучения в УФ-, видимом и ИК-диапазонах спектра. Пространственные распределения полученных величин указанных эффектов на верхней границе атмосферы, усредненных за весь указанный период, показаны на рис. 3. Пространственно-усредненные величины радиационных эффектов, относящиеся только к региону Восточной Арктики, представлены в таблице. Они соответствуют $\tau = 48$ ч (см. разд. 1).

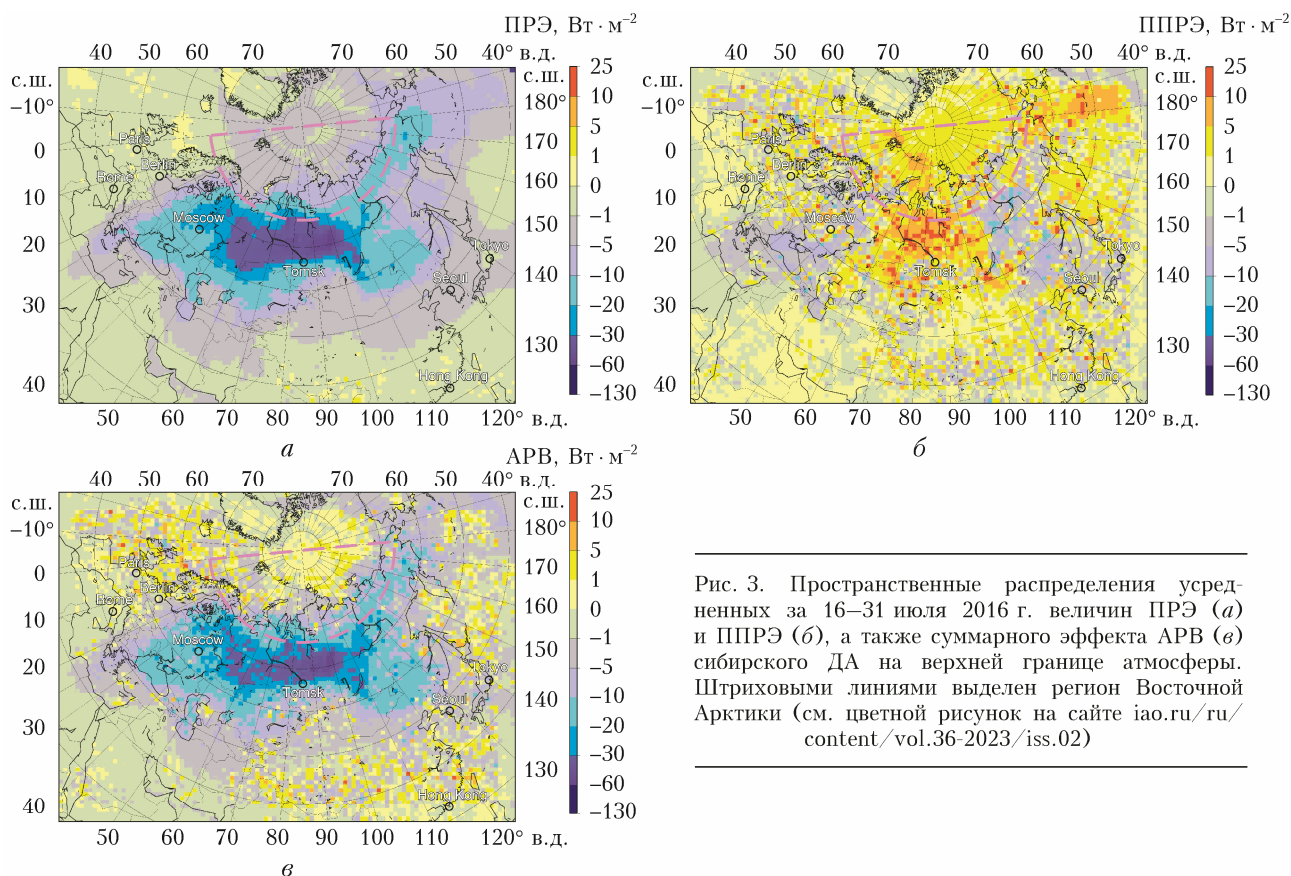


Рис. 3. Пространственные распределения усредненных за 16–31 июля 2016 г. величин ПРЭ (*а*) и ППРЭ (*б*), а также суммарного эффекта APB (*в*) сибирского ДА на верхней границе атмосферы. Штриховыми линиями выделен регион Восточной Арктики (см. цветной рисунок на сайте iaa.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.02)

Радиационные эффекты ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$) сибирского ДА на верхней (ВГА) и нижней (НГА) границах атмосферы, усредненные по времени (16–31 июля 2016 г.) и пространству (по всей Восточной Арктике или только по части ее территории, покрытой льдом или снегом)

Радиационный эффект	Восточная Арктика		Снежно-ледовая поверхность	
	ВГА	НГА	ВГА	НГА
ПРЭ	-6,0/-6,7	-6,7/-5,4	-1,2/-2,7	-2,0/-1,4
ППРЭ	2,0/1,9	1,8/1,5	1,6/1,6	1,2/0,9
APB	-4,0/-4,8	-4,9/-3,9	0,4/-1,1	-0,8/-0,5

Примечание. До и после косой черты указаны величины, вычисленные соответственно с учетом и без учета поглощающих компонент в составе сибирских дымов.

Пространственное распределение оценок ПРЭ (рис. 3, *а*) показывает, что практически внутри всей области моделирования величина этого эффекта отрицательная. Иными словами, сибирские дымы в основном выхолаживают атмосферу, что является следствием преобладания рассеяния приходящего солнечного излучения слабопоглощающими аэрозольными частицами над его поглощением. Наибольшие по модулю значения ПРЭ ($> 30 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$) получены над территорией Западной Сибири, т.е. там, где дымовые шлейфы наиболее плотные (см. рис. 2, *а, б*). Существенный, хотя и гораздо более слабый, радиационный эффект ДА ($> 5 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ по модулю) проявляется и над значительной частью Восточной Арктики. Средний по всей Восточной Арктике ПРЭ сибирского ДА на верхней границе атмосферы

в рассмотренный период составляет $-6,0 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ (таблица). Выхолаживающий эффект ДА еще сильнее на нижней границе атмосферы ($-6,7 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$) – в частности, вследствие поглощения части солнечного излучения черным и коричневым углеродом в толще атмосферы. При отсутствии в составе ДА черного и коричневого углерода ПРЭ на верхней границе увеличивается по модулю, а на нижней границе уменьшается. В целом по Восточной Арктике присутствие поглощающих компонент в составе ДА компенсирует только чуть более 10% выхолаживающего эффекта ДА, определяемого рассеивающими компонентами. Роль черного и коричневого углерода существенно возрастает над снежно-ледовым покровом океана, где эти компоненты компенсируют более половины выхолаживающего эффекта ДА

(который, как известно, уменьшается над поверхностями с высокой отражающей способностью). Отметим, что выявленное в описываемых модельных расчетах доминирование отрицательных значений ПРЭ ДА в Арктике согласуется с ранее выполненным анализом, основанным на наблюдениях [6], однако не вполне отвечает результатам некоторых модельных исследований [9, 11].

В отличие от ПРЭ значения ППРЭ преимущественно положительные (см. рис. 3, б). По модулю они в основном меньше соответствующих значений ПРЭ, но сопоставимы с ними по порядку величины. В среднем по всей Восточной Арктике ППРЭ компенсирует примерно 30% ПРЭ, что указывает на значимость этого эффекта в контексте задачи оценки эффектов АРВ в Арктике. Наиболее существенна роль ППРЭ ДА над снежно-ледовыми поверхностями. В этом случае полупрямой эффект превышает прямой по абсолютной величине и приводит к положительному эффекту АРВ ($0,4 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$). Область положительных значений эффекта АРВ за полярным кругом выделяется на рис. 3, в как крупное желтое пятно севернее 70° с.ш. и в основном совпадает с областью ледового покрова, оставшегося в Арктике к концу июля 2016 г. Заметим, что знание радиационного баланса в Арктике особенно важно над снежно-ледовыми поверхностями, поскольку его изменения могут ускорить или замедлить сокращение ледового покрова, в том числе вследствие механизма обратной связи «лед – альbedo» [40]. В этом контексте результаты выполненных в настоящей работе расчетов указывают на то, что ППРЭ должен рассматриваться, наряду с радиационным эффектом осаджений черного углерода, как существенный фактор повышения температуры в атмосфере Арктики.

Как было отмечено выше, оценки ППРЭ и эффекта АРВ, представленные на рис. 3 и в таблице, были получены при фиксированной продолжительности радиационного воздействия сибирского ДА на метеорологию ($\tau = 48 \text{ ч}$). При этом предполагалось (см. разд. 1), что хотя в общем случае оценки ППРЭ зависят от τ , эта зависимость близка к насыщающейся, и поэтому выбор конкретного (но достаточно большого) значения τ большой роли не играет. Справедливость этого предположения подтверждается результатами расчетов на рис. 4, где показаны усредненные по Восточной Арктике $\Phi_{sd}(\tau)$ и $\Phi_{ARI}(\tau)$, в том числе рассчитанные отдельно над поверхностями различных типов.

Наиболее сильный рост $\Phi_{sd}(\tau)$ и $\Phi_{ARI}(\tau)$ происходит в течение первых 10–15 ч приспособления атмосферы к аэрозольному форсингу. Далее эти величины изменяются более медленно и имеют в значительной мере нерегулярный, флуктуирующий характер, по-видимому, отражая сложную зависимость эволюции ППРЭ ДА от конкретных метеорологических условий и указывая на соответствующие неопределенности полученных оценок ППРЭ. Неопределенности могут быть уменьшены при усреднении радиационных потоков за как можно более длительный период с неизменным аэрозольным

форсингом, что едва ли осуществимо без проведения многолетних климатических расчетов. Тем не менее, несмотря на то что зависимость ППРЭ от τ указывает на значительные неопределенности полученных оценок, результаты, представленные на рис. 4, достаточно убедительно свидетельствуют о том, что воздействие ДА на метеорологические процессы в рассмотренный период в той или иной мере компенсировало выхолаживающий эффект ДА, обусловленный ПРЭ.

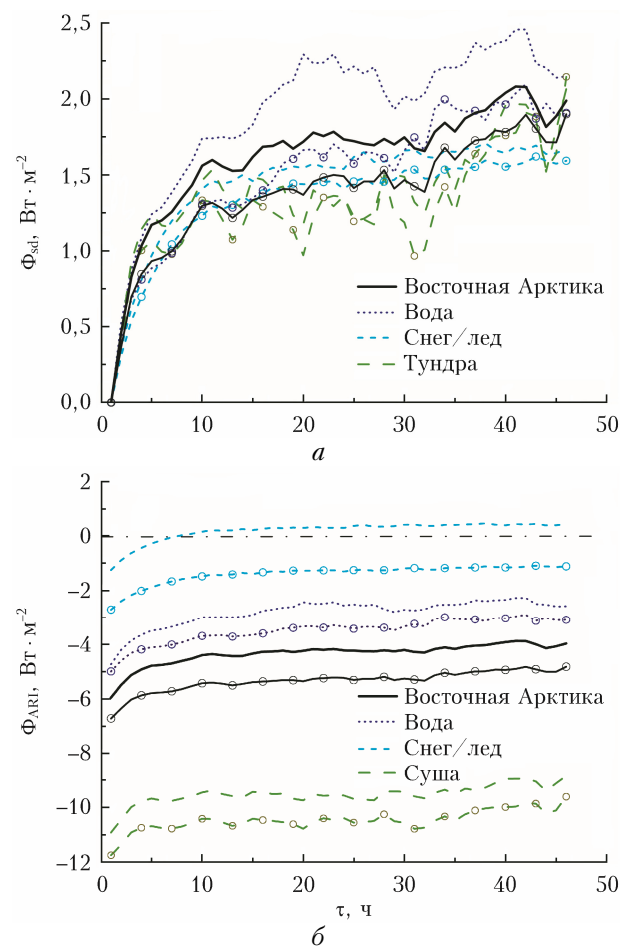


Рис. 4. Зависимости полупрямого (а) и суммарного (б) радиационных эффектов сибирского ДА на верхней границе атмосферы от продолжительности радиационного воздействия дымов в выполненных численных экспериментах. Различные кривые показывают величины радиационных эффектов, усредненные по всей территории Восточной Арктики, а также отдельно по территориям, соответствующим поверхностям трех различных типов внутри того же региона. Кругами отмечены кривые, построенные на основе результатов расчетов без учета поглощающих компонентов в составе сибирских дымов (см. цветной рисунок на сайте iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.02)

Анализ механизмов формирования ППРЭ дымов сибирских пожаров, который впервые выделен в представленном исследовании, выходит за рамки настоящей работы. Эти механизмы, по-видимому, качественно отличаются от ранее изученных (или предполагаемых) механизмов формирования ППРЭ

атмосферного аэрозоля. Действительно, традиционно полупрямой радиационный эффект атмосферного аэрозоля связывается с нагревом атмосферы за счет поглощения солнечного излучения черным углеродом [3, 20, 21, 41, 42]. Однако результаты тестовых расчетов, выполненных без поглощающих компонентов в составе сибирского ДА (см. кривые, отмеченные кружочками, на рис. 4), свидетельствуют о том, что при отсутствии аэрозольного поглощения ППРЭ не только сохраняется, но его величина лишь незначительно уменьшается по сравнению с базовым расчетом. В этой связи выскажем гипотезу, что формирование ППРЭ может быть связано с уменьшением оптической толщины облаков среднего и верхнего ярусов вследствие ослабления вертикального потока влажности, которое, в свою очередь, происходит в ответ на вызываемые аэрозольным рассеянием излучения охлаждение воздуха и ускорение конденсации паров воды в приземном слое атмосферы. Обоснование этой гипотезы и изучение роли ППРЭ сибирского ДА в климатообразующих процессах в Арктике требуют дальнейших исследований.

Заключение

Описан первый опыт применения комплекса региональных моделей, включающего в себя ХТМ CHIMERE и метеорологическую модель WRF, для исследования радиационных эффектов сибирского ДА в Арктике. Представлена оригинальная технология численных экспериментов на основе модельного комплекса CHIMERE-WRF с целью получения оценок ПРЭ и ППРЭ ДА. Некоторые возможности указанного модельного комплекса и разработанной вычислительной технологии при изучении влияния дымов сибирских пожаров на радиационный баланс атмосферы в Восточной Арктике продемонстрированы на примере численных экспериментов, охватывающих период с 16 по 31 июля 2016 г.

Результаты выполненных расчетов показывают, что в рассмотренный период сибирский ДА оказывал сильное охлаждающее воздействие на атмосферу в Восточной Арктике посредством ПРЭ, величина которого на верхней границе атмосферы составляла в среднем $-6,0 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$. Рассчитанное пространственное распределение ПРЭ сибирского ДА демонстрирует уменьшение величины этого эффекта (по модулю) по мере приближения к Северному полюсу.

В то же время полученные результаты свидетельствуют о том, что вклад ПРЭ сибирского ДА в радиационный баланс в Восточной Арктике в определенной мере компенсируется за счет ППРЭ, связанного с обратным влиянием ДА на метеорологические процессы (в частности, на облачность). Согласно модельным оценкам ППРЭ сибирского ДА в среднем положительный (т.е. приводит к нагреву атмосферы) и составляет $\sim 2 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$. Роль ППРЭ наиболее значительна над снежно-ледовыми поверхностями, где он превосходит по абсолютной величине ПРЭ, приводя к положительному сум-

марному радиационному эффекту сибирского ДА ($\sim 0,4 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$). Аргументировано качественное отличие процессов, обуславливающих возникновение ППРЭ сибирского ДА в Арктике, от ранее известных механизмов формирования ППРЭ атмосферного аэрозоля. Более детальное изучение этих процессов должно стать предметом будущих исследований.

Финансирование. Исследование прямого радиационного воздействия сибирских дымов выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-77-20109). Моделирование полупрямого радиационного эффекта сибирского дымового аэрозоля выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант № 21-55-15009).

Список литературы

1. Sand M., Berntsen T., von Salzen K., Flanner M., Langner J., Victor D. Response of arctic temperature to changes in emissions of short-lived climate forcers // Nat. Climate Change. 2016. V. 6. P. 286–289.
2. Bellouin N., Boucher O., Haywood J., Shekar Reddy M. Global estimate of aerosol direct radiative forcing from satellite measurements // Nature. 2005. V. 438. P. 1138–1141.
3. Hansen J., Sato M., Reudy R. Radiative forcing and climate response // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. P. 6831–6864.
4. Twomey S. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds // J. Atmos. Sci. 1977. V. 34. P. 1149–1152.
5. Hansen J., Nazarenko L. Soot climate forcing via snow and ice albedos // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2004. V. 101, N 2. P. 423–428.
6. Evangeliou N., Balkanski Y., Hao W.M., Petkov A., Silverstein R.P., Corley R., Nordgren B.L., Urbanski S.P., Eckhardt S., Stohl A., Tunved P., Crepinsek S., Jefferson A., Sharma S., Nøjgaard J.K., Skov H. Wildfires in northern Eurasia affect the budget of black carbon in the Arctic – a 12-year retrospective synopsis (2002–2013) // Atmos. Chem. Phys. 2016. V. 16. P. 7587–7604.
7. Журавлева Т.Б., Насртдинов И.М., Виноградова А.А. Прямые радиационные эффекты дымового аэрозоля в районе ст. Тикси (Российская Арктика): предварительные результаты // Оптика атмосфер. и океана. 2019. Т. 32, № 1. С. 29–38; Zhuravleva T.B., Nasrt-dinov I.M., Vinogradova A.A. Direct radiative effects of smoke aerosol in the region of Tiksi Station (Russian Arctic): Preliminary results // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32. P. 296–305.
8. Lisok J., Rozwadowska A., Pedersen J.G., Markowicz K.M., Ritter C., Kaminski J.W., Struzewska J., Mazzola M., Udusti R., Becagli S., Gorecka I. Radiative impact of an extreme Arctic biomass-burning event // Atmos. Chem. Phys. 2018. V. 18. P. 8829–8848.
9. Zamora L.M., Kahn R.A., Eckhardt S., McComiskey A., Sawamura P., Moore R., Stohl A. Aerosol indirect effects on the nighttime Arctic Ocean surface from thin, predominantly liquid clouds // Atmos. Chem. Phys. 2017. V. 17. P. 7311–7332.
10. Tosca M.G., Randerson J.T., Zender C.S. Global impact of smoke aerosols from landscape fires on climate and the Hadley circulation // Atmos. Chem. Phys. 2013. V. 13. P. 5227–5241.

11. Jiang Y., Lu Z., Liu X., Qian Y., Zhang K., Wang Y., Yang X.-Q. Impacts of global open-fire aerosols on direct radiative, cloud and surface-albedo effects simulated with CAM5 // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16. P. 14805–14824.
12. Sand M., Samset B. H., Balkanski Y., Bauer S., Bellouin N., Bernsten T.K., Bian H., Chin M., Diehl T., Easter R., Ghan S.J., Iversen T., Kirkevåg A., Lamarque J.-F., Lin G., Liu X., Luo G., Myhre G., Noije T.V., Penner J.E., Schulz M., Seland Ø., Skeie R.B., Stier P., Takemura T., Tsigaridis K., Yu F., Zhang K., Zhang H. Aerosols at the poles: An AeroCom Phase II multi-model evaluation // *Atmos. Chem. Phys.* 2017. V. 17. P. 12197–12218.
13. Wang X., Heald C.L., Liu J., Weber R.J., Campuzano-Jost P., Jimenez J.L., Schwarz J.P., Perring A.E. Exploring the observational constraints on the simulation of brown carbon // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18. P. 635–653.
14. Hamilton D.S., Hantson S., Scott C.E., Kaplan J.O., Pringle K.J., Nieradzik L.P., Rap A., Folberth G.A., Spracklen D.V., Carslaw K.S. Reassessment of pre-industrial fire emissions strongly affects anthropogenic aerosol forcing // *Nat. Commun.* 2018. V. 9. P. 3182.
15. Konovalov I.B., Lvova D.A., Beekmann M., Jethava H., Mikhailov E.F., Paris J.-D., Belan B.D., Kozlov V.S., Ciaïis P., Andreae M.O. Estimation of black carbon emissions from Siberian fires using satellite observations of absorption and extinction optical depths // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18. P. 14889–14924.
16. Konovalov I.B., Beekmann M., Berezin E.V., Formenti P., Andreae M.O. Probing into the aging dynamics of biomass burning aerosol by using satellite measurements of aerosol optical depth and carbon monoxide // *Atmos. Chem. Phys.* 2017. V. 17. P. 4513–4537.
17. Konovalov I.B., Golovushkin N.A., Beekmann M., Andreae M.O. Insights into the aging of biomass burning aerosol from satellite observations and 3D atmospheric modeling: Evolution of the aerosol optical properties in Siberian wildfire plumes // *Atmos. Chem. Phys.* 2021. V. 21, N 1. P. 357–392.
18. Konovalov I.B., Beekmann M., Golovushkin N.A., Andreae M.O. Nonlinear behavior of organic aerosol in biomass burning plumes: a microphysical model analysis // *Atmos. Chem. Phys.* 2019. V. 19, N 19. P. 12091–12119.
19. Zhuravleva T., Nasrtdinov I., Konovalov I., Golovushkin N., Beekmann M. Impact of the atmospheric photochemical evolution of the organic component of biomass burning aerosol on its radiative forcing efficiency: A box model analysis // *Atmosphere.* 2021. V. 12. P. 1555.
20. Lindeman J.D., Boybeyi Z., Gultepe I. An examination of the aerosol semi-direct effect for a polluted case of the ISDAC field campaign // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. P. D00T10.
21. Stofferahn E., Boybeyi Z. Investigation of aerosol effects on the Arctic surface temperature during the diurnal cycle: Part 2 – Separating aerosol effects // *Int. J. Climatol.* 2017. V. 37. P. 775–787.
22. Lu Z., Sokolik I.N. Examining the impact of smoke on frontal clouds and precipitation during the 2002 Yakutsk wildfires using the WRF-Chem-SMOKE model and satellite data // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2017. V. 122. P. 12765–12785.
23. Péré J.C., Bessagnet B., Mallet M., Waquet F., Chiappello I., Minvielle F., Pont V., Menut L. Direct radiative effect of the Russian wildfires and its impact on air temperature and atmospheric dynamics during August 2010 // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14. P. 1999–2013.
24. Menut L., Bessagnet B., Khvorostyanov D., Beekmann M., Blond N., Colette A., Coll L., Curci G., Foret G., Hodzic A., Mailler S., Meleux F., Monge J.-L., Pison I., Siour G., Turquety S., Valari M., Vautard R., Vivanco M.G. CHIMERE 2013: A model for regional atmospheric composition modeling // *Geosci. Model Dev.* 2013. V. 6. P. 981–1028.
25. Tuccella P., Menut L., Briant R., Deroubaix A., Khvorostyanov D., Mailler S., Siour G., Turquety S. Implementation of aerosol-cloud interaction within WRF-CHIMERE online coupled model: Evaluation and investigation of the indirect radiative effect from anthropogenic emission reduction on the Benelux union // *Atmosphere.* 2019. V. 10. P. 20.
26. Briant R., Tuccella P., Deroubaix A., Khvorostyanov D., Menut L., Mailler S., Turquety S. Aerosol–radiation interaction modelling using online coupling between the WRF 3.7.1 meteorological model and the CHIMERE 2016 chemistry-transport model, through the OASIS3-MCT coupler // *Geosci. Model Dev.* 2017. V. 10. P. 927–944. DOI: 10.5194/gmd-10-927-2017.
27. Menut L., Bessagnet B., Briant R., Cholakanian A., Couvidat F., Mailler S., Pennel R., Siour G., Tuccella P., Turquety S., Valari M. The CHIMERE v2020r1 online chemistry-transport model // *Geosci. Model Dev.* 2021. V. 14. P. 6781–6811.
28. Miguez-Macho G., Stenichikov G.L., Robock A. Spectral nudging to eliminate the effects of domain position and geometry in regional climate model simulations // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2004. V. 109. N D13104. P. 1–14.
29. Горчаков Г.И., Голицын Г.С., Ситнов С.А., Картов А.В., Горчакова И.А., Гуцин Р.А., Даценко О.И. Крупномасштабные дымки Евразии в июле 2016 г. // *Докл. РАН.* 2018. Т. 482, № 2. С. 209–212.
30. Bessagnet B., Menut L., Curci G., Hodzic A., Guillaume B., Lioussé C., Moukhtar S., Pun B., Seigneur C., Schulz M. Regional modeling of carbonaceous aerosols over Europe – focus on secondary organic aerosols // *J. Atmos. Chem.* 2009. V. 61. P. 175–202.
31. Levy R.C., Mattoo S., Munchak L.A., Remer L.A., Sayer A.M., Patadia F., Hsu N.C. The collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean // *Atmos. Meas. Tech.* 2013. V. 6. P. 2989–3034.
32. Konovalov I.B., Golovushkin N.A., Beekmann M., Panchenko M.V., Andreae M.O. Inferring the absorption properties of organic aerosol in Siberian biomass burning plumes from remote optical observations // *Atmos. Meas. Tech.* 2021. V. 14. P. 6647–6673.
33. McClure C.D., Lim C.Y., Hagan D.H., Kroll J.H., Capra C.D. Biomass-burning-derived particles from a wide variety of fuels – Part 1: Properties of primary particles // *Atmos. Chem. Phys.* 2021. V. 20. P. 1531–1547.
34. Kozlov V.S., Konovalov I.B., Panchenko M.V., Shmargunov V.P., Yausheva E.P. Dynamics of aerosol absorption characteristics in smoke combustion of forest biomass burning at the large aerosol chamber at the stages of generation and aging in time // *Proc. SPIE.* 2021. V. 11916. P. 119164D.
35. Konovalov I.B., Golovushkin N.A., Beekmann M., Turquety S. Using multi-platform satellite observations to study the atmospheric evolution of brown carbon in Siberian biomass burning plumes // *Remote Sens.* 2022. V. 14. P. 2625.
36. CAMS – the Copernicus Atmosphere Monitoring Service team: Global Fire Assimilation System v2.1, Fire

- Radiative Power, ECMWF. URL: <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/cams-gfas> (last access: 14.05.2022).
37. Kaiser J.W., Heil A., Andreae M.O., Benedetti A., Chubarova N., Jones L., Morcrette J.-J., Razinger M., Schultz M.G., Suttie M., van der Werf G.R. Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power // *Biogeosci.* 2012. V. 9. P. 527–554.
 38. Granier C., Darras S., Denier van der Gon H., Doubalova J., Elguindi N., Galle B., Gauss M., Guevara M., Jalkanen J.-P., Kuenen J., Liousse C., Quack B., Simpson D., Sindelarova K. The Copernicus Atmosphere Monitoring Service global and regional emissions (April 2019 version) // *Copernicus Atmos. Monitor. Service.* 2019. P. 54.
 39. Chubarova N., Nezval' Ye., Sviridenkov I., Smirnov A., Slutsker I. Smoke aerosol and its radiative effects during extreme fire event over Central Russia in summer 2010 // *Atmos. Meas. Tech.* 2012. V. 5. P. 557–568.
 40. Pistone K., Eisenman I., Ramanathan V. Radiative heating of an ice-free arctic ocean // *Geophys. Res. Lett.* 2019. V. 46. P. 7474–7480.
 41. Allen R.J., Amiri-Farahani A., Lamarque J.F., Smith C., Shindell D., Hassan T., Chung C.E. Observationally constrained aerosol–cloud semi-direct effects // *Clim. Atmos. Sci.* 2019. V. 2. P. 16.
 42. Mallet M., Solmon F., Nabat P., Elguindi N., Waquet F., Bouniol D., Sayer A.M., Meyer K., Roehrig R., Michou M., Zuidema P., Flamant C., Redemann J., Formenti P. Direct and semi-direct radiative forcing of biomass-burning aerosols over the southeast Atlantic (SEA) and its sensitivity to absorbing properties: A regional climate modeling study // *Atmos. Chem. Phys.* 2020. V. 20. P. 13191–13216.

I.B. Kononov, N.A. Golovushkin, T.B. Zhuravleva, I.M. Nasrtdinov, V.N. Uzhegov, M. Beekmann.
Application of the CHIMERE-WRF model complex to study the radiative effects of Siberian biomass burning aerosol in the eastern Arctic.

A computational technology for studying aerosol-radiation interactions and calculating regional estimates of the direct and semi-direct radiative effects of biomass burning (BB) aerosol based on calculations with the CHIMERE chemistry-transport model coupled to the WRF meteorological model is described. The technology was applied to the numerical study of the radiative effects of Siberian BB aerosol in the eastern Arctic in the period of July 16–31, 2016. The simulation results show that Siberian BB aerosol had a significant cooling effect on the atmosphere in the eastern Arctic in that period due to the direct radiative effect (DRE), the value of which at top of the atmosphere was, on average, $-6.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, being minimal over the snow-ice cover of the ocean ($-1.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$). At the same time, it is found that the contribution of the Siberian BB aerosol DRE to the radiative balance of the Arctic atmosphere is compensated to a certain extent by the semi-direct radiative effect (SDRE), which is positive on average ($2.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$). The SDRE is formed as a result of the aerosol feedback on meteorology during many hours of the evolution of the atmosphere and plays the most important role over the snow-ice cover, where it exceeds the DRE in absolute value. It has been shown that the SDRE of Siberian BB aerosol in the performed numerical experiments is mainly due to the process of scattering (rather than absorption) of radiation by aerosol particles.