ПРИРОДНЫЕ ПОЖАРЫ: ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

 $A.B. \, Eлисеев^{(1),(2),(3)*}, \, A.B. \, Bacuльева^{(2)}$

1) Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, с. 2; *адрес для переписки: eliseev.alexey.v@gmail.com

 $^{2)}$ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер., 3

³⁾ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия, 420097, Казань, ул. Товарищеская, 5

Реферат. Проведён обзор сведений о природных пожарах (ПП) и анализ современных подходов к моделированию ПП. Особое внимание уделено вопросам включения моделей ПП в глобальные модели Земной системы.

В последние годы по спутниковым данным появилась возможность идентификации даже небольших пожаров (с размером < $500 \, \mathrm{m}$). Тем не менее, сохраняется значительная неопределённость оценок площади выгорания изза ПП, а также связанных с ними эмиссий веществ в атмосферу. По наиболее представительным спутниковым данным GFED-4.1 ежегодная площадь выгорания из-за пожаров близка к $5 \, \mathrm{mnh} \, \mathrm{km}^2$, в том числе не менее $2.9 \, \mathrm{mnh} \, \mathrm{km}^2$ изза собственно природных пожаров. Это приводит к эмиссиям углерода $\sim 2 \, \mathrm{ПrC} \, \mathrm{rog}^{-1}$, в основном в виде CO_2 . На территории России ежегодная площадь выгорания близка к $135 \, \mathrm{тыс.} \, \mathrm{km}^2$ с ежегодным выделением в атмосферу $0.12 \, \mathrm{ПrC} \, \mathrm{гоg}^{-1}$. Эти оценки заметно превышают соответствующие оценки Национального доклада о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, за $1990-2015 \, \mathrm{rr.}$

Характеристики ПП изменяются при межгодовых вариациях климата, в том числе в годы Эль-Ниньо. При этом по спутниковым данным для последних десятилетий на масштабах от глобального до субконтинентального значимых трендов характеристик ПП не выявлено. По прокси-данным и модельным расчётам выявляются общая интенсификация активности ПП в доиндустриальном голоцене (в том числе при похолодания климата), а также общее увеличение этой активности от холодных стадиалов плейстоцена к тёплым межстадиалам.

В настоящее время схемы расчёта характеристик ПП внедряются в модели Земной системы. Такие схемы учитывают погодные и/или климатические характеристики развития пожаров, количество возгораний в зависимости от характеристик молниевой активности и плотности населения (а иногда и от способа хозяйственной деятельности), ликвидацию (тушение) пожаров соответствующими службами, количество и тип топлива для пожаров, полноту

сгорания топлива. Ряд моделей способны воспроизводить динамику отдельных пожаров в упрощённой форме. Однако недостаточность современных знаний о ПП приводит к заметному межмодельному различию даже для воспроизведения многолетних средних характеристик ПП, а также для коэффициентов тренда изменения этих характеристик. В частности, для XX века основные межмодельные различия в изменениях характеристик активности ПП обусловлены предположениями о влиянии землепользования на динамику ПП. Таким образов, требуется дальнейшее развитие этих моделей и уточнение их определяющих параметров.

Ключевые слова. Природные пожары, модели Земной системы, изменения климата, спутниковые данные, эмиссии в атмосферу, углеродный баланс, аэрозоли, метан, биосферно-атмосферное взаимодействие.

Введение

Природные пожары (ПП) играют важную роль как в динамике экосистем, так и в глобальных биогеохимических циклах (Hantson et al., 2016; Lasslop et al., 2019). Роль ПП в динамике экосистем обусловлена их влиянием на особенности функционирования этих экосистем, в том числе за счёт появления гарей и, следовательно, высвобождения площади для колонизации молодыми растениями. Влияние природных пожаров на характеристики биогеохимических циклов связано с выделением в атмосферу ряда веществ (включая парниковые газы и аэрозоли) в процессе горения (Seiler, Crutzen, 1980; Гришин, 1981; Andreae, Merlet, 2001; Akagi et al., 2011; van der Werf et al., 2017; Елисеев, 2017, 2018; Andreae, 2019). При этом также изменяется химический состав почв и функционирование наземных экосистем (Pellegrini et al., 2018). Выгорание растительности также может приводить к изменению переноса энергии и влаги между экосистемами и атмосферой, перестраивая характеристики термического и гидрологического режимов Земной системы (Li et al., 2017; Li, Lawrence, 2017; Liu et al., 2018). Более того, ПП способны приводить к мультистабильности состояния экосистем в лесостепных регионах (Lasslop et al., 2016).

Возникновение и развитие природных пожаров, в свою очередь, определяется рядом факторов, в том числе связанных с характеристиками климата, растительности, почвогрунта и населения (рис. 1). При этом, в частности, можно ожидать двунаправленной (обратной) связи между климатом и природными пожарами.

Всё это обуславливает необходимость как эмпирических, так и модельных исследований ПП. При этом в первом случае необходим анализ как крупномасштабных характеристик природных пожаров (площади выгорания, общую массу выделенных в атмосферу веществ) на региональном и глобальном уровне, так и анализа отдельных процессов, определяющих характеристики ПП. Для модельных исследований особую роль приобретает адекватный учёт связи характеристик природных пожаров с изменяющимися во времени факторами, такими как климат, тип экосистем и плотность населения. Несмотря на то, что первая глобальная модель ПП была разработана и включена в

модель Земной системы около двух десятилетий назад (Thonicke et al., 2001), к настоящему времени модели Земной системы, как правило, не учитывают ряд важных связанных с природными пожарами процессов.

Целью данной статьи является обзор известных сведений о природных пожарах и анализ современных подходов к моделированию ПП. При этом особое внимание уделяется вопросам включения моделей ПП в глобальные модели Земной системы и полученным результатам моделирования.

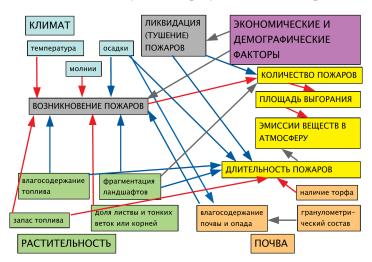


Рисунок 1. Общая схема влияния различных факторов на активность природных пожаров Цветом выделены различные группы факторов, связанные с климатом (синий), растительностью (зелёный), почвой (коричневый) и населением (фиолетовый). Дополнительно прописными буквами указана группа факторов. Строчными буквами в прямоугольниках того же цвета указаны факторы внутри данной группы. Серым цветом выделены процессы, связанные с развитием пожаров. Жёлтым указаны связанные с природными пожарами переменные, важные либо для анализа ущерба, либо для включения в модель земной системы. Стрелками указаны связи в системе: синими — когда увеличение значения переменной, от которой начинается стрелка, приводит к уменьшению значения переменной, на которой эта стрелка заканчивается (или, соответственно, подавлению процесса, на котором заканчивается стрелка), красными — соответствующие усиливающие связи, серые — знакопеременные связи

Figure 1. General scheme of impact of different factors on natural fires activity

Colour depicts different groups of factors: climatic (blue), vegetation (green), soil (brown), and
human population (violet). In addition, group names are shown in uppercase letters. Individual
factors are shown in lowercase letters in the rectangles of the respective colour. Gray colour figures
the processes related to the development of fires. Yellow colour shows variable important either for
estimating damages from fires or important for implementing into the Earth system model. Arrows
depict relations in the system: in blue, when the increase of the starting variable suppresses variable
at which the arrow ends, in red when the increase of the starting variable enhances variable at which
the arrow ends, and in gray when this relation is not sign-determined

Роль природных пожаров в глобальном углеродном цикле и динамике экосистем

Общие сведения о природных пожарах

Выделяют верховые, низовые и подземные (или торфяные) пожары (Мелехов, 1947; Гришин, 1981). При верховом пожаре огонь распространяется в кронах деревьев, но в случае повального пожара может также охватить подлесок и

подрост. При наличии сильного ветра такие пожары способны быстро распространяться за счёт переноса искр из горящих ветвей. Низовой пожар характеризуется преимущественным горением травяного покрова, подроста и подлеска. Подземные (торфяные) пожары возникают ниже уровня поверхности суши в залежах сухого торфа и характеризуются малой скоростью горения.

Процессы, протекающие при природных пожарах, характеризуются широким интервалом пространственных и временных масштабов (Sullivan, 2009а). Наименьшие такие масштабы характеризуются непосредственно химией горения (от 10^{-4} до 10^{-2} м и от 10^{-20} до 10^2 с соответственно). Характерный размер частиц горения составляет от 10^{-3} до 10^{-2} м. Горение сопровождается распространением энергии за счёт излучения длинноволновой радиации, теплопроводности и конвекции. Перенос энергии за счёт этих процессов характеризуется пространственными масштабами от 10^{-1} до 10^1 м. При этом наиболее быстрым (с временными масштабами от 10^{-9} до 10^1 с) процессом перенос энергии три ПП является её излучение. Медленнее происходит перенос энергии за счёт теплопроводности и конвекции – интервалы временных масштабов составляют от 10^{-2} до 10^1 с и от 10^1 до 10^2 с соответственно.

При движении фронта горения топливо нагревается за счёт переноса энергии излучением и переноса явного тепла. При нагреве топлива сначала в нём происходит испарение воды и других летучих соединений, затем пиролитическое разложение и выделение летучих и частично летучих веществ. Возгорание этих веществ приводит к химическому разложению сложных молекул на более простые и на радикалы с одновременным формированием ряда новых химических продуктов (Andreae, 2019).

Химические процессы при ПП определяются химическим составом растительности и почвы. Согласно (Гришин, 1981, табл. 3.1.1 и 3.1.2), сухая масса растений в основном складывается из массы целлюлозы (($C_6H_{10}O_5$) $_n$) и лигнина (смеси ароматических природных полимеров). Доля целлюлозы в сухой массе растений при этом составляет от 17 до 60%, а лигнина - от 20 до 38%. Оставшаяся доля сухой массы (от 1 до 5%, для ряда биологических видов - до 29%) приходится на зольные вещества

Основными веществами, выделяющимися при природных пожарах, являются углекислый газ CO_2 , угарный газ CO, метан CH_4 , неметановые углеводороды, молекулярный водород H_2 , окислы азота NO_x , закись азота N_2O , сернистый газ SO_2 , аммиак NH_3 , различные углеродосодержащие аэрозоли (в том числе элементарный углерод (сажа) и органические углеродные аэрозоли) и т.д. (Seiler, Crutzen, 1980; Гришин, 1981; Andreae, Merlet, 2001; Akagi et al., 2011; van der Werf et al., 2017; Andreae, 2019).

Важной характеристикой химии горения при ПП является эффективность горения (combustion efficiency, CE), определяемая как молярная доля CO_2 в общем количестве сгоревшего углерода. Ввиду трудности прямого измерения этой величины, вместо неё часто используют модифицированную эффективность горения (modified combustion efficiency, MCE), определяемую через отношение молярного количества CO_2 и CO (μ_{CO2} и μ_{CO} соответственно) как μ_{CO2} / (μ_{CO2} + μ_{CO}), которая отличается от CE не более чем на несколько

процентов (Ferek et al., 1998). Для быстрого (с наличием пламени) горения МСЕ достигает 0.99, тогда как при тлении она находится в интервале от 0.65 до 0.85 (с наиболее частыми значениями около 0.8) (Akagi et al., 2011).

В частности, быстрая реакция молекулярного кислорода O_2 с выделяющимися из горящей биомассы газами при пламенном сгорании происходит, как правило, при наличии листвы или сухого топлива относительно небольшого размера (веток). При этом углерод, водород, азот и сера образуют, соответственно, углекислый газ CO_2 , водяной пар H_2O , окислы азота NO_x и сернистый газ SO_2 , а также чёрный (сажевый) углеродный аэрозоль. В свою очередь, тление может происходить либо в виде газификации топлива ("свечения"), либо в виде пиролиза (термического разложения) (Andreae, 2019). При этом выделяются угарный газ CO, метан CH_4 , неметановые углеводороды и первичный органический аэрозоль. В языках пламени при ПП яркостная температура на длине волны 4 мкм может достигать около 1400 K, при тлении — \sim 800-1000 K (Kaufman et al., 1998). Температура горения или тления влияет на химический состав продуктов горения.

Методы наблюдения за природными пожарами

Важным источником информации о связанных с ПП процессах являются натурные и лабораторные эксперименты (Гришин, 1981; Akagi et al., 2011). Здесь особо следует выделить отечественную физико-химическую школу по физике горения в Томском государственном университете, которая была основана А.М. Гришиным (напр, (Гришин, 1981, 1992, 1994; Гришин и др., 1997; Grishin et al., 2014)). Постановка специальных экспериментов в натурных условиях (как правило, на лесных площадках, деревья которых были предназначены к уничтожению ввиду болезней или повреждения короедом) с контролируемыми пожарами при проведении большого количества синхронных измерений позволила получить уникальные данные о химических, аэрологических и теплофизических процессах при ПП.

В свою очередь, лабораторные эксперименты со сгоранием древесных и травяных образцов позволяют оценить такие характеристики, как коэффициенты выделения того или иного вещества при природных пожарах в зависимости от типа топлива. При этом, однако, надо иметь в виду, что в ряде случаев скорость горения в лабораторных экспериментах отличается от типичной скорости горения при ПП в случае того же типа топлива (Yokelson et al., 2008; Akagi et al., 2011). Эмпирические поправки для учёта этого эффекта предложены в (Yokelson et al., 2008).

До примерно середины 1990-х гг. основным методом оценки крупномасштабных характеристик лесных пожаров было обобщение данных национальных служб лесоохраны (Whelan, 1995; Goldammer, Furyaev, 1996; Conard, Ivanova, 1997; Stocks et al., 2002; Обязов, 2012). В частности, таким способом были оценены такие характеристики ПП, как их количество, размер, длительность, источники возгорания, общая площадь выгорания из-за природных пожаров. Инвентаризация сгоревшей биомассы также позволяет оценить эмиссии веществ в атмосферу из-за пожаров.

Несмотря на огромную ценность таких данных, они характеризуются рядом недостатков, например, недостаточным охватом земного шара, прежде всего в труднодоступных регионах. В последние несколько десятилетий активно развиваются спутниковые методы мониторинга лесных пожаров (Kasischke et al., 2005; Giglio et al., 2010; 2013; Randerson et al., 2012; Пономарев, Швецов, 2013; Швиденко, Щепащенко, 2013; Барталев и др., 2015; Бондур, Гинзбург, 2016; Бондур и др., 2016, van der Werf et al., 2017; Humber et al., 2019). При этом пожар идентифицируется либо по коэффициенту отражения радиации от поверхности (гари характеризуются меньшим таким коэффициентом по сравнению с растительностью), либо по яркостной температуре пламени пожара (Randerson et al., 2012). В случае идентификации пожаров за счёт коэффициента отражения поверхности, во-первых, необходима корректировка данных для исключения уже существовавших (связанных с ранее прошедшими ПП) гарей, во-вторых – пространственное разрешение современных спутниковых данных не позволяет выявлять пожары с горизонтальным размером менее примерно 500 м. При использовании яркостной температуры пламени пожара для его идентификации возможно обнаружение и более мелких пожаров, но только если эта вспышка находится в пределах видимости того или иного спутника.

Спутниковые данные для эмиссий веществ за счёт ПП строятся по оцененной площади выгорания либо с использованием инвентаризационных данных для запаса и типа биомассы (Kasischke et al., 2005; Швиденко, Щепащенко, 2013; Бондур, Гинзбург, 2016), либо по результатам расчёта этих характеристик с моделями наземного углеродного цикла при задании их входных переменных по данным наблюдений (van der Werf et al., 2017). В первом случае необходимо обобщение данных измерений в небольшом числе пунктов на большие площади с неизбежной неопределённостью, связанной с таким обобщением. Во втором случае качество оценок эмиссий определяется, в том числе, качеством используемой модели биогеохимических циклов. В обоих случаях оценки проводятся с использованием модели Зяйлера-Крутцена (Seiler, Crutzen, 1980) при учёте полноты сгорания топлива и массы выделяемого при пожаре того или иного вещества на единицу сгоревшей биомассы.

Активность ПП в климатические эпохи прошлого может быть реконструирована либо по данным отложений древесного угля (Marlon et al., 2008, 2016; Power et al., 2015), либо по содержанию метана в пузырьках ледовых кернов и изотопного состава этого метана (Harrison et al., 2018). В первом случае невозможна классификация пожаров на природные и сельскохозяйственные. Во втором случае необходимо предположение хорошего перемешивания не только для концентрации метана, но и для его изотопологий, а выделение типа пожара (природный или сельскохозяйственный) также затруднительно.

Эмпирические данные о крупномасштабных характеристиках природными пожаров

В соответствии с данными GFED-4.1 (Global Fire Emission Database, version 4.1) (Randerson et al., 2012; van der Werf et al., 2017) в среднем за 2003-

2016 гг. на Земле ежегодно происходило примерно 4.4 млн пожаров (табл. 1). Примерно 7.5% из них были зарегистрированы на территории России. Ежегодная площадь выгорания A_f из-за пожаров (природных и антропогенных) в среднем в указанный период времени составила около 5 млн км², в том числе около 135 тыс. км² — на территории России (табл. 1, рис. 2). Последняя величина чувствительна к конкретному выбору региона. Например, при замене территории России на регион 42-75°с.ш., 27-180°в.д. (Vivchar, 2011) ежегодно в 2000-2016 гг. выгорает 240 ± 81 тыс. км². При исключении сельскохозяйственных пожаров и пожаров с целью освобождения земель от леса (т.е. учёте только собственно ПП) многолетнее среднее для глобальной площади выгорания оказывается равным 2.9 млн км² (рис. 2).

 Таблица 1. Статистические характеристики природных и антропогенных пожаров по данным GFED 4.1. Представлены многолетние средние и межгодовые стандартные отклонения.

 Значения округлены до ближайших целых. Для России оценки выполнены без учёта Крыма и с использованием данных о государственной границы страны, взятых с сайта thematicmapping.org/downloads/world borders.php.

Table 1. Statistical characteristics of natural and anthropogenic fires based on the GFED 4.1 data. Long-term means and interannual standard deviations are shown. The values are rounded to nearest integers. For Russia, the estimates are reported without the Crimea Peninsula; the Russian national boundary data are downloaded from thematicmapping.org/downloads/world_borders.php.

Характеристика	Глоба	ально	Россия	
Аарактеристика	1997-2016 гг.	2003-2016 гг.	1997-2016 гг.	2003-2016 гг.
число пожаров, тыс.	-	$4\ 355 \pm 924$	-	335 ± 126
площадь выгорания, тыс. км2	4929 ± 423	4446 ± 344	135 ± 48	134 ± 52
эмиссии углерода в атмос-	$2\ 100 \pm 314$	$2\ 003 \pm 168$	139 ± 65	133 ± 61
феру, ТгС год ⁻¹				
в том числе				
все природные	1968 ± 295	1877 ± 155	111 ± 62	105 ± 61
лесные	1372 ± 128	1313 ± 79	104 ± 61	98 ± 58
степные	516 ± 146	498 ± 97	5 ± 2	5 ± 2
торфяные	81 ± 119	65 ± 63	2 ± 1	2 ± 1
сельскохозяйственные	132 ± 19	127 ± 17	28 ± 11	27 ± 12

Массив GFED-4.1 является расширением массива GFED-4 (Giglio et al., 2013) за счёт привлечения данных о яркостной температуре пламени при пожарах и, таким образом, учёта пожаров с горизонтальным размером менее 500 м (см. выше). В связи с последним этот массив также иногда обозначается как GFED-4s (последняя буква является сокращением от слова "small"). При учёте небольших по размеру пожаров площадь выгорания при ПП увеличилась примерно на треть (Randerson et al., 2012), особенно в низких широтах. Территория России находится в двух регионах, выделенных GFED в соответствии с преобладающим типом экосистем: BOAS (boreal Asia; большая часть страны) и CEAS (central Asia; юг европейской территории России). В среднем для 2001-2010 гг. для обоих этих регионов вклад учёта малых пожаров увеличил площадь выгорания на примерно 3/3 относительно версии без учёта малых пожаров (Randerson et al., 2012). При этом относительное увеличение эмиссий углерода в атмосферу из-за ПП составило около ¹/₃ для BOAS (с преобладанием тайги), тогда как для CEAS (где доминируют степи и лесостепи) эти эмиссии даже удвоились.

Тем не менее, современные (в том числе спутниковые) данные о площади выгорания из-за ПП характеризуются большой неопределённостью. Так, в (Humber et al., 2019) было проведено сравнение 4 массивов спутниковых данных для площади выгорания: MODIS (The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) MCD45A1(Roy et al., 2005) (он служит основой GFED-4 и предыдущего поколения этой базы GFED-3), MODIS MCD64A1 (Randerson et al., 2012) (служит основой GFED-4.1), SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre) Vegetation Copernicus Burnt Area (Tansey et al., 2008) и Fire CCI (Climate Change Initiative) (Alonso-Canas, Chuvieco, 2015). Различное пространственное разрешение используемых инструментов и особенности обработки исходных спутниковых измерений привело к двукратному различию A_f между этими данными. Ещё большие различия отмечены на региональном уровне (для ряда регионов — даже на порядок величины) с несистематическим изменением соотношения этой площади между разными спутниковыми данными в разных регионах.

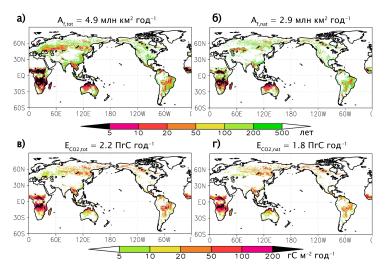


Рисунок 2. Характеристики пожаров по данным GFED-4.1, осреднённые за 1997-2016 гг. Представлены интервалы повторяемости (а, б) пожаров и годовые эмиссии CO_2 (в, г) для всех зарегистрированных пожаров (а, в) и только природных пожаров (б, г). Природные пожары были выделены исключением сельскохозяйственных пожаров и пожаров с целью дефорестации. У рисунков а и б указаны глобальные ежегодные площади выгорания, а у рисунков в и г — глобальные эмиссии CO_2 в атмосферу из-за пожаров Figure2. Characteristics of fires averaged based on the GFED-4.1 data and averaged over 1997-2016.

Figure2. Characteristics of fires averaged based on the GFED-4.1 data and averaged over 1997-2016. Shown are fire return intervals (upper row) and annual CO_2 emissions into the atmosphere (lower row) from all fires (left colum) and from the natural fires only (right column). Natural fires were extracted by excluding agricultural fires and deforestation fires. The numbers near the panels show the global values: the total burnt area for the upper row and the total CO_2 emissions for the lower row

Для России ранее полученные оценки недоучитывали вклад небольших пожаров в общую площадь выгорания, так что A_f в них не превышала 90 тыс. км² (табл. 2). Согласно оценкам (Пономарев, Швецов, 2013) в Сибири около 90% площади выгорания связано с наиболее крупными (площадь каждого из которых превышает 20 км²) пожарами, которые наиболее легко обнаруживаются, но доля которых в общем числе зарегистрированных пожаров близка к 5%, тогда как площадь почти половины зарегистрирован-

ных пожаров не превышает 0.2 км². Последнее значение близко к пространственному разрешению спутниковых данных до начала использования яркостной температуры пламени для детектирования ПП. Для региона 42-75°с.ш., 27-180°в.д. (границы которого близки к границам России) переход от предыдущей версии GFED к версии 4.1 увеличил площадь выгорания примерно на пятую часть.

В настоящее время в России на национальном уровне проводится инвентаризация эмиссий парниковых газов, в том числе от природных пожаров. В частности, к настоящеу времени доступна часть 1 Национального доклада о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, за 1990-2015 гг. (НДК, 2017). Площадь выгорания в этом докладе взята по данным Рослесхоза и оказывается заметно меньше (около 35 тыс. км²), чем по другим оценкам (табл. 1, 2). Следует отметить, что оценки площади выгорания по данным Рослессхоза используются и в других публикациях авторов указанного Национального доклада (Виноградова и др., 2015; Смирнов и др., 2015; Романовская и др., 2016; Romanovskaya et al., 2020). Оценки связанных с ПП эмиссий веществ в атмосферу в Национальном докладе проводятся с использованием с использованием модели Зяйлера-Крутцена и стандартных табулированных данных о запасах биомассы в экосистемах различных типов и о параметрах природных пожаров (более подробно см. (НДК, 2017)). По видимому, более низкие по сравнению с другими оценками значения площади выгорания, использованные в (НДК, 2017) являются причиной и более низких по сравнению с другими оценками эмиссий веществ в атмосферу при природных пожарах.

В каталоге "Fire Atlas" (Andela et al., 2019), тесно связанным с массивом данных GFED-4.1, зарегистрированы более 13 тыс. пожаров (природных и антропогенных) в 2003-2016 гг. Для этого массива средний размер гари из-за отдельного природного пожара равен 4.4 км², а средняя длительность пожара составляет 4.5 сут. При этом среднее увеличение площади гари из-за ПП равно $0.6 \text{ км}^2 \text{ сут.}^{-1}$, а средняя скорость смещения фронта пожара $-0.9 \text{ км сут.}^{-1}$ Отмечен также рекордный пожар в Австралии 2007 г., охвативший более 40 тыс. км², продолжавшийся 72 сут., фронт которого продвигался со скоростью 19 км сут. $^{-1}$

Региональные особенности площади выгорания из-за ПП обычно характеризуют через повторяемость пожаров. Будучи выражен в годах, он является величиной, обратной ежегодно выгорающей доли площади выбранного региона (например, если ежегодно в выбранном регионе в среднем выгорает 1% территории, то повторяемость пожаров равна 100 лет). Типичные значения повторяемости пожаров в степях составляют порядка 10 лет, в лесах — 100 лет и более (может достигать почти 1000 лет во влажных лесах тропиков) (рис. 2).

Источником возгорания в регионах с малой плотностью населения преимущественно служат молнии (Stocks et al., 2002). В густонаселённых регионах, с другой стороны, большая часть ПП связана с антропогенными возгораниями и происходит либо вблизи населённых пунктов, либо вблизи дорог. Например, для Европы среди ПП с установленными источниками возгорания в 2006-2010 гг. лишь от 0.5 до 7% были связаны с молниевыми возго-

раниями, а остальные – с антропогенными (Ganteaume et al., 2013). Подобное справедливо также для густонаселённых регионов на юге Канады (Stocks et al., 2002).

Согласно данным GFED-4.1 при ПП в зависимости от типа экосистем 82-94% сгоревшего углерода, выделяются в виде углекислого газа, 5-16% — в виде угарного газа, до 4% — в виде метана (две последние доли максимальны при торфяных пожарах), см. табл. 2 и 3 (для России полученные статистические оценки близки к опубликованным в (Швиденко, Щепащенко, 2013)). Это практически полностью замыкает углеродный баланс ПП. При этом суммарная молярная доля CO_2+CO составляет 96% при торфяных пожарах и \geq 98% при ПП лесных и травяных экосистемах. С учётом того, что время жизни угарного газа в атмосфере не превышает 1 мес., причём при его окислении образуется углекислый газ (Суркова, 2002), на межгодовом и большем временном масштабе выделение углерода при ПП практически полностью происходит в виде CO_2 .

Тем не менее, при природных пожарах происходит выделение и большого ряда других веществ, в том числе углеродосодержащих (Akagi et al., 2011). Среди них – сажевые углеродные аэрозоли (так называемый элементарный углерод), органические углеродосодержащие аэрозоли и большое количество углеводородов С_пH_m. Кроме того, происходит выделение молекулярного водорода (в зависимости от типа экосистем от 2.0 до 3.5 г; здесь и далее в этом абзаце приведены значения на 1 кг сгоревшей сухой биомассы), окислов азота (от 1 до 4 г), азотной кислоты HONO (от 0.2 до 1.2 г), закиси азота (до 0.4 г; выделение происходит при пожарах в лесах умеренного пояса и бореальных лесах), нитратов (до 0.14 г; выделение происходит только при пожарах в тропических естественных экосистемах и в сельскохозяйственных угодьях), фосфатов (не более 0.01 г), сернистого газа (до 0.5 г), сульфатов (до 0.2 г). Общее выделение твёрдых аэрозолей (как углеродосодержащих, так и других) с диаметром до 2.5 мкм составляет от 6 (при горении травы и мелких сельскохозяйственных останков) до 16 (при горении древесины) грамм. Соответствующие интервал для частиц с диаметрами от 2.5 до 10 мкм составляет около 18 г при пожарах в тропических лесах и около 30 г при огневой обработке пастбищ.

Согласно оценкам GFED-4.1 (van der Werf et al., 2017), общие эмиссии за счёт всех пожаров (как природных, так и сельскохозяйственного назначения) в 1997-2016 гг. составили $2.2 \pm 0.3~\rm HrC~roд^{-1}$ (табл. 3, рис. 2); указаны многолетнее среднее и межгодовой стандартное отклонение) с минимумом $1.8~\rm HrC~roд^{-1}$ в 2013 г. и максимумом $3.0~\rm HrC~roд^{-1}$ в 1997 г. Следует отметить, что запас топлива для пожаров в базе данных GFED оценивается с использованием модели CASA-GFED (Carnegie-Ames-Stanford Approach-GFED). В (Елисеев, 2017) при исключении пожаров сельскохозяйственного назначения (дефорестация и сжигание мусора, в том числе сельскохозяйственных останков) по данным предыдущей версии GFED-4 была получена оценка интенсивности эмиссий углерода в атмосферу из-за ПП, равная $1.4 \pm 0.2~\rm HrC~roд^{-1}$. Для данных GFED-4.1 соответствующее многолетнее среднее равно $1.8~\rm HrC~roд^{-1}$ (рис. 2).

и в бореальной зоне Северного полушария в целом; интервал значений характеризует эмиссии при предположениях об интенсивности пожаров; для площади выгорания даны значения в годы с минимальной и максимальной пожарной активностью. Для остальных источников указаны многолетние средние значения и межгодо-Оценки эмиссии (Швиденко, Щепащенко, 2013) были получены умножением многолетнего среднего и межгодового стандартного отклонения для полных эмиссий Оценки эмиссий по (Kasischke et al., 2005) получены исходя из предоставленной авторами информации о соотношении (34) эмиссий от природных пожаров в России В столбце "Эмиссии С" указана сумма эмиссий углерода в виде газов СО $_2$, СН $_4$ и СО. Оценки эмиссий (НДК, 2017) взяты из табл. 6.10 и 6.50 указанного доклада. вые среднеквадратические отклонения. Оценки эмиссий (Soja et al., 2004) даны для «стандартного» сценария интенсивности пожаров, указанного в этой работе. Оценки выгоревших площадей и эмиссий приведены с учётом поправок (Васильева, 2012). Оценки площади выгорания непосредственно в (Виноградова, Васиуглерода в атмосферу из-за ПП на приведённые авторами значения вклада соответствующих веществ. РМ^{2,5} – аэрозоли с размером твёрдых частиц > 2.5 мкм. Габлица 2. Статистические характеристики природных пожаров для России по разным источникам.

льева, 2017) опубликованы не были, но являлись частью вычислений.

ИСТОЧНИК	регион	времени	число пожаров, 1 тыс.	число плопиль пожаров, выторания, тыс. тыс. км²	Эмиссии С, ТгС год ⁻¹	эмиссии СО ₂ , ТгС годг ¹	жиесии эмиссии СО ₂ СО, ТгС год ⁻¹ ТгС год ⁻¹	эмисени СН ₄ , ТгС год ¹	эмиссии N2O, Мг год ⁻¹	эмиссии сажевых аэрозолей, ТгС год ⁴	эмиссии органических углеродных а эрозолей, TrC год ¹	полные эмиссии углеродосо- держаних аэрозолей, TrC год ¹	эмиссии РМД-5, Тг год ¹
(HДК, 2017)	Виссия	2000-2015 rr		36±6			5.0 ± 0.4	0.4 ± 0.1	29 ± 2				
(HДK, 2017)	Россия, лесиые 2000-2015 гг. земли	2000-2015 FE		31±6		45 ± 4	5.0 ± 0.4	0.4 ± 0.1	28 ± 2				
(Soja et al., 2004)	Россия восточнее Урала	1998-2002 FE		91 ± 15	252 ± 54	220 ± 47	26.8 ± 5.7	2.7 ± 0.6					
(Kasischke et al., 2005)	Россия восточнее Урала	1992, 1995 - 2003 r.e.		9-217	79 – 156		10.7 - 24.7						
(Вивкар и др., 2010)	41-75oc.m., 27-180oв.п.	2000-2009 rr		194±72			10.1 ± 4.7						
(Vivchar, 2011)	42-75°c.m., 27-180°в.п.	2000-2008 rr		08 ± 86I									
(Vasileva et al., 2011)	(41-60° c.m., 27-60° в.д.) + (49-60° с.ш., 60-120° в.д.)	2007-2008 rr					6.4 – 11.6						
(Vasileva, Moiseenko, 2013)	42-75°с.ш., 10-180°в.д.	2000-2011 гг.		214±23				0.8 ± 0.2					
(Швиденко, Щепаценко, 2013)	Росия	1998-2010 re		82		102 ± 24	9.9±23	1.3 ± 0.3		0.12 ± 0.03	1.5 ± 0.3	4.2 ± 1.0	1.5±0.3
(Пономарев, Швецов, 2013)	Сибирь	1996-2012 rr	~ 20										
(Смирнов и др., 2015)	Россия	2007-2012 rc								0.08 ± 0.04			
(Виноградова и др., 2015)	Сибирь и Дальний Восток	2000-2013 rr								0.03 ± 0.01			
(Романовская и др, 2016)	Россия	2000-2013 rr								0.07			
(Барталев и др., 2015)	Россия, только 2006-2013 г.г. леса	2006-2013 rr		23									
(Бондур, Гинзбург, 2016)	Россия	2010-2014 rr		90 ± 30		81 ± 49	7.4 ± 4.0						2.6 ± 1.5
(Бондур и др., 2016)	Россия	2005-2016 rr		130 ± 53									
(Виноградова, Васильева, 2017)	52-750 с.ш., 30-1800 в.д.	2000-2013 rr		96 ± 41						0.12 ± 0.06			

По оценкам (van der Werf et al., 2017) в среднем за указанный временной интервал 65% эмиссий углерода в атмосферу связаны с пожарами в саваннах и степях, 15% — с пожарами в тропических лесах (включая антропогенные пожары с целью дефорестации), 7% — с пожарами в бореальных лесах, 4% — с торфяными пожарами, 6% — с сельскохозяйственными пожарами. Вклад российских регионов в общие эмиссии основных углеродосодержащих веществ не превышает 13% от глобальных значений соответствующих эмиссий для лесных и степных пожаров и 3% — для торфяных пожаров.

Таблица 3. Эмиссии веществ из-за природных и антропогенных пожаров в 2000-2016 гг. по данным GFED

Таблица составлена на основании https://www.geo.vu.nl/~gwerf/GFED/GFED4/tables/ и https://www.geo.vu.nl/~gwerf/GFED/GFED4/. В первой строке каждой ячейки приведены многолетние средние и межгодовые стандартные отклонения в Тг год¹¹. Для содержащих углерод веществ также в других строках таблицы приведены соответствующие значения в ТгС год¹¹ (в круглых скобках) и доля в общей эмиссии углерода при ПП (в квадратных скобках, только для многолетних средних). Для органических углеродных аэрозолей этот вклад оценен, исход из молярной доли О:С = 0.39-0.45 (Chen et al., 2009) при дополнительном предположении однородного распределения этой доли внутри указанного интервала. В данной таблице, в отличие от табл. 1 и 2, под территорией России понимается область 42-75°с. п., 27-180°в.д. (Vivchar, 2011). Прочерк означает, что эмиссии затруднительно оценить по имеющимся данным. ТРМ — все твёрдые аэрозоли, РМ2.5 — аэрозоли с размером твёрдых частиц ≥ 2.5 мкм

Table 3. Emissions from natural and anthropogenic fires in 2000-2016 based on the GFED data The table is based on data https://www.geo.vu.nl/~gwerf/GFED/GFED4/tables/ and https://www.geo.vu.nl/~gwerf/GFED/GFED4/tables/ and https://www.geo.vu.nl/~gwerf/GFED/GFED4/. In the first row of each cell, the long-term means and interannual standard deviations are shown (Tg yr¹¹). For the carbon-containing compounds, in addition, the corresponding values in TgC yr¹¹ are shown in other rows (in round brackets) as well as the contribution to the total carbon emission from natural fires (in square brackets; only for the long-term means). For organic carbon, this contribution is estimated based on the molar ratio O:C = 0.39-0.45 (Chen et al., 2009) under additional assumption of the uniform distribution of this ration in the indicated interval. ContraryTables 1 and 2, in this table the Russian territory is bounded by 42-75°N 27-180°E (Vivchar, 2011). Dash depicts that emissions are difficult to estimate based on the available data. TPM stands for all particulate aerosol, and PM_{2.5} stands for particulate aerosols with sizes ≥ 2.5 μm

	Все пожары		все неторфяные при- родные пожары и пожары с целью дефорестации в тропиках		торфяные пожары	
	глобально	Россия	глобально	Россия	глобально	Россия
CO ₂	6989±603 (1906±165) [92.0%]	488±201 133±55 [87.5%]	6361±541 (1735±148) [92.5%]	375±187 102±51 [86.8%]	177±187 (48±51) [79.5%]	6±4 1.7±1.1 [82.0%]
СО	334±41 (143±18) [6.9%]	37±17 (16±7) [10.5%]	284±29 (122±12) [6.5%]	29±16 (13±7) [11.1%]	23±23 (10±10) [16.5%]	0.8±0.5 (0.3±0.2) [14.4%]
CH ₄	15±3 (11±2) [0.5%]	1.8±0.8 1.4±0.6 [0.9%]	11±2 (8±1) [0.4%]	1.3±0.7 1.0±0.6 [0.9%]	2±2 (2±2) [3.3%]	0.08±0.05 0.06±0.04 [2.9%]
ВС	1.8±0.2 [0.1%]	0.17±0.07 [0.1%]	1.6±0.2 [0.1%]	0.12±0.06 [0.1 %]	0.004±0.004 [< 0.1%]	-
OC	16±2 (10±2) [0.5%]	2.4±1.2 (1.5±0.8) [1.0%]	14±2 (9±2) [0.5%]	2.2±1.2 (1.4±0.8) [1.2%]	0.6±0.7 (0.4±0.4) [0.7%]	0.02±0.01 (0.012±0.006) [0.6%]
NO _x	14±1	0.53±0.17	13±1	0.32 ± 0.13	0.1 ± 0.1	0.004±0.002
N ₂ O	0.9±0.1	0.10 ± 0.05	0.8±0.1	0.09 ± 0.05	0.02 ± 0.02	(7±5)·10 ⁻⁴
SO ₂	2.2±0.2	0.28±0.14	2.0±0.2	0.25±0.14	0.04 ± 0.04	$(1.4\pm1.1)\cdot10^{-3}$
TPM	44±5	5±2	39±4	4±2	1.4±1.4	0.05±0.03
PM _{2.5}	35±4	4.0±2.0	31±3	3.5±1.9	1.0±1.0	0.03±0.02

Выделение веществ в атмосферу при ПП сопровождается изменением химического состава почвы и функционирования экосистем. Так, в (Pellegrini et al., 2018) было проанализировано изменение такого состава на экспериментальных площадках в разных природных зонах. На десятилетнем временном масштабе на площадках, расположенных в лиственных лесах и саваннах, ПП приводили к уменьшению содержания углерода и азота в почве, тогда как на площадках, расположенных в хвойных лесах, содержание этих элементов, наоборот, увеличивалось, несмотря на их выгорание, за счёт осаждения продуктов горения в почву и изменения видового состава растительности в сторону более продуктивных видов.

Наконец, следует отметить, что используемые в настоящее время в моделях (в том числе в модели CASA, используемой при подготовке массива GFED) коэффициенты эмиссии веществ на единицу сгоревшей биомассы не учитывают выделение пирогенного углерода (PyC; прежде всего, древесного угля) при высокотемпературных реакциях. Образующиеся продукты при этом химически инертны (с временем жизни от нескольких сотен до нескольких тысяч лет; в океане даже до 20 тыс. лет), что выводит образовавшийся углерод из активного углеродного цикла. Согласно (Jones et al., 2019), в 1997-2016 гг. интенсивность образования пирогенного углерода составила $0.26 \pm 0.05~\Pi rC~roд^{-1}$, т.е 10-15% от годовых эмиссий углерода в атмосферу при ПП. В настоящее время в почве содержится от 80 до 450 Tr PyC, в океане — до 30 Tr PyC, в донных отложениях океана — от 100 до 500 Tr PyC. Всё это может привести к необходимости ревизии существующих баз данных для эмиссий веществ в атмосферу при ПП.

Изменение характеристик природных пожаров в разные климатические эпохи

По данным GFED-4.1 в 1997-2017 гг. статистически значимых трендов изменения площади выгорания из-за ПП и соответствующих веществ в атмосферу не выявлено (van der Werf et al., 2017).

Однако выявляются значимые вариации A_f и эмиссий веществ в атмосферу в отдельные годы. В частности, эти переменные глобально достигали примерно 3 ПгС год $^{-1}$ в 1997-1998 гг. – годы сильнейшего Эль-Ниньо с развитием засушливых условий в большом числе регионов суши (van der Werf et al., 2014). В 1997 г. аномально большими были эмиссии CO_2 , CO и CH_4 из-за торфяных пожаров в юго-восточной Азии в 1997 г. (регион CEAS базы данных GFED), где в указанный год они достигли 0.5 ПгС год $^{-1}$, тогда как в 1998-2016 гг. эмиссии этих газов из-за торфяных пожаров в регионе CEAS не превышали 0.2 ПгС год $^{-1}$. В 1998 г. увеличение площади выгорания и эмиссий веществ в атмосферу отмечалось в регионах лесостепей центральной Америки и центральной Африки (при этом на севере африканского региона саванн пожарная активность была даже меньше обычной) и в ряде таёжных регионов Евразии и Северной Америки (van der Werf et al., 2014).

Для России в целом в последние десятилетия максимальные площади выгорания по данным GFED-4.1 отмечались в 1998 г. (198 тыс. $\rm km^2$), 2003 г.

(224 тыс. км²), 2006 г. (177 тыс. км²), 2008 г. (242 тыс. км²). По данным (Бондур и др., 2016) в 2006 г. площадь выгорания больше (235 тыс. км²), а в 2008 г. – меньше (202 тыс. км²), чем по данным GFED-4.1.

В частности, для пожаров лета 2010 г. в Поволжье эмиссии СО оценены величиной 9.7 Тг (4.2 ТгС) (Konovalov et al., 2011), а соответствующие эмиссии CO_2 — интервалом от 256 до 302 Тг (70-82 ТгС) (Guo et al., 2017). При этом для ряда примесей (CO, O_3 , твёрдые аэрозольные частицы с размером ≥ 10 мкм) в начале августа 2010 г. отмечалось превышение допустимой концентрации в воздухе (Konovalov et al., 2011).

Для России в целом в (Бондур и др., 2016) отмечен тренд уменьшения площади выгорания в 2005-2016 гг. Однако он преимущественно обусловлен двумя годами с высокой активностью ПП в начале анализируемого периода (это становится ещё более очевидно при анализе тренда A_f по данным GFED-4.1 для 1997-2016 гг. В разных регионах страны экстремально высокая активность ПП отмечалась в 1998, 2003, 2010 и 2012 гг. Тем не менее, в последние годы и десятилетия в ряде регионов отмечается усиление пожарной активности и рост сопутствующих эмиссий. В частности, оно отмечено для восточной Сибири (Ракитин и др., 2017) и Забайкалья (Обязов, 2012).

Анализ отложений древесного угля с использованием базы данных GCDv3 (Global Charcoal Database version 3) показал, что на глобальном уровне отмечалось увеличение характеристики сжигания биомассы (так называемого zscore Z_t) во второй половине XIX века и уменьшение – в первой трети XX столетия (Marlon et al., 2016). Это уменьшение сменилось соответствующим увеличением во второй трети XX века. В последней трети XX столетия снова отмечалось уменьшение сжигания биомассы, которое сменилось резким ростом на рубеже XX и XXI веков. Эти изменения обусловлены соотвествующим изменением в Северном полушарии. В Южном полушарии практически монотонный рост Z_f отмечается с середины XIX до середины XX веков с последующим уменьшением характеристики сжигания биомассы во второй половине XX столетия и резким возобновлением роста на рубеже XX и XXI веков. При этом во всех регионах Z_f меняется мало на протяжении последнего тысячелетия вплоть до середины XVIII века. Тем не менее, в последние примерно 14 тыс. лет в большинстве регионов суши выявляется общее увеличение горения биомассы (Marlon et al., 2016). В тропиках и в Южном полушарии начало этого роста датируется ещё раньше – примерно 18 тыс. лет назад. Следует отметить, что тренды изменения Z_f в голоцене в большинстве регионов чувствительны к представительности данных по отложениям древесного угля. В частности, эти тренды заметно меняются при использовании массива GCDv3 по сравнению с предыдущими версиями базы данных GCD (Marlon et al., 2008; Power et al., 2008).

На протяжении плейстоцена в целом отмечается усиление активности ПП в тёплые эпохи и ослабление – в холодные. Это справедливо как для перехода между основными оледнениями и межледниковьями, так и при изменениях климата между стадиалами и межстадиалами при событиях Дансгара-Ёшгера и Хайнриха (Daniau et al., 2010).

Для последних двух тысячелетий результаты анализа характеристик сжигания биомассы по отложениям древесного угля хорошо согласуются с соответствующими результатами по содержанию и изотопному составу метана в ледовых кернах (Harrison et al., 2018).

Вклад ПП в интенсивность обратной связи между климатом и углеродным циклом (в терминах увеличения содержания CO_2 в атмосфере) оценивается величиной 5.6 ± 3.2 млн⁻¹ K⁻¹ (на единицу потепления суши) (Harrison et al., 2018). Это – примерно треть от общей интенсивности вклада наземных экосистем в коэффициент обратной связи между климатом и углеродным циклом (медианное значение 17.5 млн⁻¹ K⁻¹ (Arora et al., 2013)).

Моделирование природных пожаров на разных пространственных и временных масштабах

Классы моделей возникновения и развития природных пожаров

Широкий спектр пространственных и временных масштабов, связанных с природными пожарами, затрудняет построение моделей ПП на основе фундаментальных законов физики и химии (часто называемых "первыми принципами"). В связи с этим для разных классов задач используются разные классы моделей (Sullivan, 2009а).

Класс механистических моделей ("физических" по терминологии (Sullivan, 2009а)) использует кинетические уравнения для химии горения, уравнения механики сплошной среды и баллистические уравнения для описания переноса веществ и горящих частиц и уравнения термодинамики сплошной среды для описания температуры этих частиц (Sullivan, 2009а; Гришин, 1981). Эти модели очень дороги вычислительно — в (Sullivan, 2009а) приведён пример модели FIRETEC, которая на доступной в начале 2000-х гг. вычислительной технике требовала несколько часов процессорного времени для воспроизведения процессов, происходящих в течение 200 с физического времени в трёхмерном объёме, представленном дискретной сеткой с числом узлов около 1 млн. Как следствие такие модели могут быть использованы только для исследовательских целей. Вычислительные ограничения часто требуют упрощения задачи до двумерной.

Класс эмпирических и квазиэмпирических моделей (Sullivan, 2009b) основывается на соотношениях, полученных либо в натурных, либо в лабораторных экспериментах. Как правило, основой таких моделей является соотношение для скорости распространения фронта пожара v_x в зависимости от скорости ветра, характеристик топографии, типа топлива и его влагосодержания. При этом если эмпирические модели основываются только на информации, полученной в натурных или в лабораторных экспериментах, то квазиэмпирические также используют те или иные теоретические представления. Такие модели часто используются в целях оперативного прогноза погодной опасности возникновения пожаров или распространения уже возникшего пожара (см. следующий раздел).

В современных моделях Земной системы наиболее часто используются так

называемые имитационные модели (Sullivan, 2009с). Как правило, они основаны на "первых принципах" — законе сохранения массы различных элементов. Следует, однако, учитывать, что модели Земной системы, как правило, являются глобальными с горизонтальным разрешением, по крайней мере, несколько градусов широты и долготы, и эти модели необходимо интегрировать не менее чем на несколько десятилетий. Как следствие, вычислительные ограничения приводят к тому, что кинетика горения в имитационных моделях зачастую сводится к набору эмпирических соотношений, связывающих крупномасштабные характеристики горения с внешними условиями. К этому классу относится, например, группа моделей, разработанных в Томском государственном университете под руководством А.М. Гришина (Гришин, 1981, 1992, 1994).

Погодные характеристики пожароопасности и модели оперативного прогноза

В оперативных прогнозах необходима оценка влияния текущего состояния погоды на опасность возникновения природных пожаров. В российской практике для этого часто используют индекс пожароопасности В.Г. Нестерова (Нестеров, 1949), для которого также используется термин "комплексный показатель пожароопасности" (КПО). Согласно ГОСТ Р 22.1.09-99, он вычисляется по приземной полуденной температуре t и температуре точки росы t_d (обе – в градусах Цельсия):

$$K\Pi O = \Sigma_i t_i (t_i - t_{di}). \tag{1}$$

Здесь индекс i указывает на календарный день, а суммирование производится по дням с осадками < 3 мм, начиная от последнего дня с осадками ≥ 3 мм. В соответствии с вычисленным значением КПО погодной ситуации приписывается степень пожарной опасности – от отсутствующей (КПО $\le 300(^{\circ}\text{C})^2$) и малой $(300(^{\circ}\text{C})^2 \le \text{K}\Pi\text{O} \le 1000(^{\circ}\text{C})^2)$ до высокой $(4000(^{\circ}\text{C})^2 \le \text{K}\Pi\text{O} \le 10000(^{\circ}\text{C})^2)$.

В практике Лесной службы Канады используется альтернативный индекс пожароопасности (forest fire danger index – FFDI), определяемый по относительной влажности приземного воздуха RH (в процентах), приземной полуденной температуре точки росы t_d (в градусах Цельсия), осреднённой за 5-10 мин приземной скорости ветра v (в м с⁻¹) и безразмерного индекса засушливости DF (McArthur, 1967; Holgate et al., 2017):

$$FFDI = 2 \cdot exp(-0.45 + 0.987 \cdot \ln DF - 0.0345 \cdot RH + 0.0338 \cdot t_d + 0.0234 v). \tag{2}$$

Индекс засушливости DF является функцией от числа дней от даты с осадками > 2 мм, интенсивности осадков за эту дату и дефицита влаги в почве.

Таким образом, индекс FFDI учитывает большее число переменных, чем индекс КПО, при этом эти переменные теснее связаны с физическими характеристиками засух – погоды, способствующей возникновению пожаров. Тем не менее, сравнение этих двух индексов в (Анисимов и др., 2012, с. 286-292) показало, что они в целом дают сравнимые между собой результаты. При этом следует иметь в виду, что индекс Нестерова требует меньше входных данных и вычисляется проще.

В (Мохов, Чернокульский, 2010) предложено уточнение индекса КПО, учитывающее региональные особенности распределения осадков. Альтернативное уточнение КПО предложено в (Анисимов и др., 2012), где высказано предположение о целесообразности введения региональной дифференциации пороговых значений КПО, соответствующих переходу опасности возникновения ПП из одной градации в другую.

Ещё одним важным классом моделей, необходимым для приложений, являются оперативные модели распространения ранее возникшего пожара. В российской практике чаще всего для этой цели используется эмпирическая модель (Софронов, 1967). В этой модели скорость распространения фронта пожара описывается соотношением

$$v_x = v_0 K_j K_h K_{w'} \tag{3}$$

где v_{θ} – штилевая скорость движения фронта на горизонтальной поверхности, множитель K_{j} характеризует влияние уклона вдоль направления движения пожара и зависит от наклона поверхности и направления распространения фронта, множитель K_{h} описывает влияние относительной влажности воздуха, а множитель K_{w} – влияние направления и скорости ветра.

Более физически обоснованной является модель (Rothermel, 1972). В ней предполагается наличие баланса между интенсивностями выделения I_R и диссипации $D=\rho_b\,\varepsilon\,Q_{ig}$ энергии при горении. Это приводит к соотношению

$$v_{x} = I_{R} \, \xi \, \varphi_{w} / D. \tag{4}$$

Здесь ξ — доля выделяющейся энергии, затрачиваемая на нагрев топлива для последующего горения, φ_w — параметр, описывающий влияние ветра, ρ_b — плотность топлива, ε — параметр, описывающий структуру этого топлива, Q_{ig} — энергия, необходимая для возгорания. Соотношение Ротермеля используется в оперативных прогнозах Лесной службы США (US Forest Service).

Отметим, что все указанные модели относятся к эмпирическим или квазиэмпирическим по классификации (Sullivan, 2009a) (см. также предыдущий раздел). В частности, модель (Софронов, 1967) может служить пример эмпирической модели ПП, а модель (Rothermel, 1972) – как пример квазиэмпирической соответствующей модели. Другие примеры моделей оперативного прогноза приведены в (Sullivan, 2009b).).

Схемы описания природных пожаров в моделях Земной системы

Общая структура

Все существующие схемы моделей описания ПП в моделях Земной системы (МЗС) состоят из следующих блоков (рис. 3):

- оценка пожароопасности для текущих погодных (или климатических, если модель не воспроизводит изменчивость синоптического масштаба) условий;
- вычисления запаса топлива различного типа (листва, ветки, стволы, опад, трава, кустарники, торф) и её характеристик;
 - вычисление вероятности возгорания и ликвидации возникших пожаров;
 - при необходимости классификация типов пожара(ов);

- вычисления характеристик распространения пожара(ов);
- при необходимости вычисление длительности пожара(ов);
- вычисление площади выгорания из-за пожара(ов);
- вычисление выделения веществ в атмосферу из-за пожара(ов).

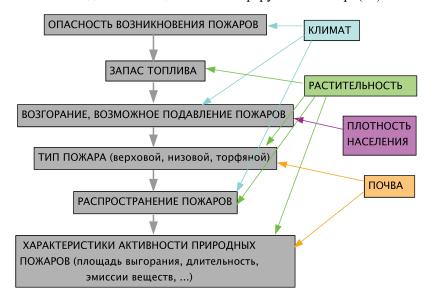


Рисунок 3. Общая структура схема вычисления характеристик природных пожаров в моделях Земной системы

Основные этапы вычислений указаны прямоугольниками серого цвета и серыми линиями со стрелками соответственно. Другими цветами выделены различные группы факторов, определяющие характеристики природных пожаров. Стрелками соответствующего цвета указано влияние этих факторов на конкретные этапы вычислений

Figure 3. The implementation scheme for calculating natural fires characteristics in the Earth system models

The major calculation steps are shown by gray rectangles and by gray arrows correspondingly. Other colours show different groups of factors affecting natural fires. Arrows of the respective colour show influence of those factors on individual calculation steps

Модели GlobFIRM и RegFIRM

Исторически первой схемой вычисления характеристик ПП в МЗС была модель GlobFIRM (Thonicke et al., 2001). В ней вычислялась лишь среднегодовая площадь выгорания, которая определялась исходя из вероятности возгораний в различные сезоны года. Эта вероятность, в свою очередь, связывалась с влагосодержанием почвы без учёта влияния источников возгорания. Эмиссии СО₂ в атмосферу вычислялись по модели типа Зяйлера-Крутцена без учёта выделения других веществ при ПП. Эта схема была включена в модель динамики растительности (LPJ) (Lund-Potsdam-Jena) (Thonicke et al., 2001). Модель может быть откалибрована на воспроизведение средних многолетних величин характеристик ПП и их отклика на внешнее воздействие, но уже на уровне крупных стран (напр., Франции) результаты расчётов с ней заметно отклоняются от данных наблюдений даже для средних многолетних величин.

Развитием модели GlobFIRM является модель RegFIRM (Venevsky et al., 2002). В ней, во-первых, учитывается влияние антропогенных и молниевых источников возгорания на возникновение ПП. При этом было предложена

связь числа антропогенных возгораний с плотностью населения p_d (чел. км $^{-2}$), которая с тех пор широко используется в схемах ПП M3C:

$$I_{f,a} \sim p_d \cdot p_d^{-0.6} = p_d^{0.4}.$$
 (5)

Во-вторых, в отличие от модели GlobFIRM, в RegFIRM учитывается сезонность $\Pi\Pi$.

Соотношение, связывающее $I_{f,a}$ и p_d , подобно соотношению $I_{f,a} \sim p_d^{1/2}$ (Мелехов, 1978), используемому в практике отечественного лесоведения. Следует, однако, отметить, что и в модели RegFIRM, и в практике лесоведения $I_{f,a}$ имеет смысл числа непотушенных пожаров, тогда как в ряде других моделей эта переменная интерпретируется как число возгораний, которое затем умножается на коэффициент непотушенных пожаров (см. ниже).

Модель СССта

Влияние различных факторов на число пожаров было детализировано в схеме ПП Канадского центра моделирования и анализа климата (Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis, CCCma) (Arora, Boer, 2005). В ней вероятность возгорания на единицу площади представлена в виде произведения

$$P_f = P_b P_m P_i. (6)$$

Первый множитель в правой части этого выражения связывает вероятность возгорания с запасом углерода в надземной биомассе c_{ag} :

$$P_b = \max\{\ 0, \min[\ 1, (\ c_{ag} - c_{low}) \, / \, (\ c_{up} - c_{low}) \,] \ \}, \tag{7}$$

где $c_{low}=0.2~{\rm krC~m^{-2}},\,c_{up}=1~{\rm krC~m^{-2}}.$ Он интерпретируется как характеристика фрагментации ландшафтов. Второй множитель в (5) характеризует зависимость вероятности возгорания от влагосодержания почвы в корневой зоне. Наконец, множитель P_i характеризует вероятность возгорания в зависимости от наличия источника такого возгорания:

$$P_i = P_n + (1 - P_n) P_a. (8)$$

Здесь P_a — вероятность возгорания из-за деятельности человека (для которой используется соотношение типа (5)), а вероятность возгорания из-за естественных источников P_n является функцией от частоты молний L. При этом при $L \leq 0.02~{\rm mec}^{-1}~{\rm km}^{-2}$ молниевые возгорания невозможны, а увеличение частоты молний сверх порога $0.85~{\rm mec}^{-1}~{\rm km}^{-2}$ не приводит к изменению P_n . Следует отметить нелинейное взаимодействие между вероятностями антропогенных и естественных возгораний.

В модели Канадского центра моделирования и анализа климата считается, что отдельные пожары имеют форму эллипса с наибольшей главной осью по направлению ветра, и изменение обеих главных осей эллипса определяется скоростью ветра у поверхности и влагосодержанием корневой зоны почвы. Прекращение пожара описывается пуассоновским процессом с вероятностью отдельного события, равной 1/2. Отметим, что приближение отдельного пожара эллипсом с изменяющейся геометрией мало влияет на оценки макроскопических характеристик даже отдельных пожаров (Гришин, 1981, 1994).

Указанная схема включена в разрабатываемую в Канадском центре моделирования и анализа климата M3C CanESM.

Схема Годдардовского института космических исследований

В Годдардовском институте космических исследований Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства США (National Aeronautics and Space Administration Goddard Institute for Space Research, NASA GISS) получили дальнейшее развитие идеи модели RegFIRM о влиянии различных источников возгорания на развитие природных пожаров (Pechony, Shindell, 2009). В ней вероятность возникновения пожара вычисляется в зависимости от полного числа возгораний на единицу площади в единицу времени $I = I_a + I_n$, где для числа антропогенных возгораний используется соотношение типа (5)), а число молниевых возгораний считается равным числу молниевых ударов "облако-земля". Особенностью модели является учёт ликвидации возникающих пожаров как функции плотности населения, так что доля непотушенных пожаров

$$f_{NS} = c_1 + c_2 \exp(-\omega p_d) \tag{9}$$

с постоянными $c_1=0.05,\,c_2=0.9,\,\omega=0.05$ км²/чел. Окончательно число пожаров в модельной ячейке за единицу времени

$$N_f \sim (I_a + I_n) f_{NS}. \tag{10}$$

Следует специально отметить, что, во-первых, здесь, в отличие от моделей RegFIRM и Канадского центра моделирования и анализа климата, соотношение (5) интерпретируется не как полное число антропогенных пожаров, а как число антропогенных возгораний (как ликвидированных, так и непотушенных). Во-вторых, при выбранных в (Pechony, Shindell, 2009) значениях c_1 и c_2 при $p_d=0$ $f_{NS}=0.95<1$. Тем не менее, соотношения (9) и (10) в настоящее время широко используются в схемах ПП МЗС для описания источников возгорания разных типов и ликвидиации пожаров соответствующими службами. При этом, как правило, значения c_1 и c_2 изменяются, чтобы $f_{NS}=1$ при $p_d=0$ (Kloster et al., 2010; Елисеев и др., 2017). Кроме того, в ряде случаев в сельскохозяйственных угодьях считается $I_a\equiv 0$ (Елисеев, 2011; Eliseev, Mokhov, 2011; Eliseev et al., 2014; Елисеев и др., 2017).

Схема NASA GISS в настоящее время включена в ряд климатических моделей, в том числе в модель общей циркуляции GISS. В перекалиброванном виде она также включена в модель CLM 3.5 (Common Land Model, version 3.5) (Kloster et al., 2010, 2012). Кроме того, можно отметить схему (Li et al., 2012), являющейся комбинацией схем СССта и NASA GISS. Последняя ко времени написания данного обзора версия схемы Годдардовского института космических исследований получила название ругЕ (Mezuman et al., 2020).

Модель SPITFIRE

Наиболее детальной схемой ПП для M3C к настоящему времени является модель SPITFIRE (SPread and InTensity of FIRE) (Thonicke et al., 2010). В ней выделены три класса топлива для пожаров с разными временными масштабами горения – от 1^0 ч. до 1^2 ч. Ещё один тип мёртвой био-

массы — стволы — не влияет на распространение пожаров в модели. Площадь выгорания за единицу времени определяется погодным индексом пожароопасности (основанном на индексе Нестерова) и ожидаемыми количеством возгораний и площади пожара. Подобно модели СССта, общее количество возгораний вычисляется с учётом нелинейного взаимодействия между количеством естественных и антропогенных возгораний. Количество естественных и антропогенных возгораний также вычисляется подобно модели СССта, но с несколько изменённой зависимостью $I_a(p_d)$. Отдельные природные пожары приближаются эллипсами, геометрия которых зависит от скорости и направления приземного ветра, причём для скорости смещения фронта пожара используется уравнение Ротермеля.

В настоящее время схема SPITFIRE фактически стала стандартом схемы ПП для детальных МЗС и внедрена в ряд моделей деятельного слоя суши МЗС, такие как LPJ (Thonicke et al., 2010), JSBACH (Lasslop et al., 2014), ORCHIDEE (Organising Carbon and Hydrology In Dynamic Ecosystems) (Yue et al., 2014), CLM5 (Lawrence et al., 2019).

В (Pfeiffer et al., 2013) предложена модификация модели LPJ-SPITFIRE (LPX), учитывающая і) кластеризацию ударов молний в близко расположенные к друг другу объекты, что понижает вероятность возгорания от молний, іі) зависимость количества антропогенных возгораний от типа хозяйственной деятельности (как для современного общества, так и для более раннего общества, включая первобытное).

Модель INFERNO

В схеме INFERNO (INteractive Fire and Emission algoRithm for Natural envirOnments) (Mangeon et al., 2016) алгоритм вычисления количества пожаров подобен соответствующему алгоритму в модели NASA GISS, но с коэффициентом непотушенных пожаров f_{NS} , экспоненциально зависящим от плотности населения. Кроме того, в ней число естественных возгораний

$$I_n = k_n L \tag{11}$$

с постоянным коэффициентом $k_n < 1$. Особенностью модели является предписание средней площади единичного пожара $A_{PFT,0}$ (с учётом зависимости от типа растительности PFT), так что в части модельной ячейки, занятой этим типом растительности площадь выгорания

$$A_f = I \tilde{F}_{PFT} A_{PFT,0}, \tag{12}$$

где F_{PFT} – коэффициент, зависящий от метеорологических условий и типа растительности. Схема INFERNO внедрена в M3C HadGEM2.

Модель ИФА РАН

Модель ИФА РАН разрабатывалась для МЗС промежуточной сложности — климатической модели (КМ) ИФА РАН (Мохов, Елисеев, 2012; Мохов и др., 2020). В её первоначальном варианте (Eliseev, Mokhov, 2011; Елисеев, 2011) использовалась несколько модифицированная модель GlobFIRM. Однако при последующем развитии в модель был включён учёт источников возгорания — как антропогенных (подобно схеме NASA GISS), так и молниевых (подобно схеме CCCma) (Елисеев и др., 2017). При этом учитывается ликвидация пожа-

ров (также подобно схеме NASA GISS, но с выполнением условия $f_{NS}(0) = 1$) и влияние фрагментации ландшафтов на развитие ПП (этот блок заимствован из модели СССта). Особенностью модели является учёт торфяных пожаров (Елисеев и др., 2014; Eliseev et al., 2014). Пожары этого типа в настоящее время учитываются, наряду с КМ ИФА РАН, лишь в модели ССМ5 (Climate Change..., 2013, табл. 6.7), но при включении модели ССМ5 в МЗС связанная с торфяными пожарами часть кода не активируется (Т. Кляйнен, личное сообщение). Таким образом, КМ ИФА РАН — единственная МЗС, в расчётах с которой учитывается отклик торфяных пожаров на изменения климата и влияние эмиссий от этих пожаров на динамику углеродного цикла.

Модельные оценки изменения характеристик природных пожаров при изменениях климата

Недостаточная детальность современных моделей ПП дополнительно усиливается недостатками воспроизведения характеристик климата моделями Земной системы, вариаций этих характеристик на разных временных масштабах, а также важных для ПП характеристик наземного углеродного цикла — прежде всего, запаса топлива.

В проекте FireMIP (Fire Model Intercomparison Project) был проведён анализ воспроизведения характеристик ПП современными моделями деятельного слоя суши, включающими схемы ПП в качестве интерактивных модулей (Teckentrup et al., 2019). Расчёты с моделями проводились для 1700-2015 гг. при задании вариаций характеристик климата (в том числе частоты молний), изменения содержания СО₂ в атмосфере, притока к почве минеральных веществ к наземным экосистемам, землепользования и плотности населения по данным наблюдений и реконструкций. В моделях FireMIP даже современная плотность выгорания (за счёт и природных, и сельскохозяйственных пожаров) заметно различается между моделями – от 3.5 до 5.3 млн км 2 год $^{-1}$ (для одной модели эта площадь равна всего лишь 0.4 млн км 2 год $^{-1}$) (Hantson et al., 2020). Модели в целом воспроизводят пространственную структуру и особенности сезонного хода площади выгорания, но неадекватно воспроизводят её межгодовую изменчивость даже при задании атмосферного воздействия по данным реанализа (Hantson et al., 2020). При этом согласие лучше для моделей, учитывающие пожары не только в естественных экосистемах, но и на сельскохозяйственных угодьях. Коэффициент линейного тренда площади выгорания для 1921-2013 гг. между моделями изменяется от -2.2 до +2.4 млн км 2 год $^{-1}$ за столетие (Teckentrup et al., 2019). При этом модели с большой современной площадью выгорания характеризуются максимальным уменьшением A_f за указанный период, а с малой — максимальным ростом.

Основную роль в межмодельном различии коэффициента тренда площади выгорания играют предположения о развитии пожаров на пастбищах (следует иметь в виду, что на пашнях во всех моделях ансамбля FireMIP развитие пожаров запрещено). Вторым по важности фактором является влияние изменений плотности населения на динамику пожаров (природных и сельскохозяйственных). Накопление CO₂ в атмосфере на протяжении XX века приводит

к небольшому положительному тренду A_f во всех моделях из-за увеличения запаса топлива. В свою очередь, влияние изменений климата (в том числе частоты молний) мало сказывается на на изменении площади выгорания.

В МЗС неопределённость воспроизведения характеристик ПП дополнительно усиливается (по сравнению с моделями деятельного слоя суши, подоб-FireMIP) используемым проекте модельными воспроизведения характеристик климата. В среднем для 1981-2005 гг. в численансамбля CMIP5 (Coupled Models экспериментах моделями c Intercomparison Project, phase 5) площадь выгорания изменяется от 1.5 до 2.1 млн км² год⁻¹ (что ниже даже оценки площади выгорания только для природных пожаров), тогда как эмиссии углерода в атмосферу изменяются от 1.9 до 2.7 ПгС год⁻¹ (т.е. оказываются в целом больше даже соответствующих оценок GFED-4.1 для пожаров всех типов). Существенные отклонения модельной площади выгорания от данных GFED-4.1 отмечаются для всех регионов.

Изменение эмиссий углерода в атмосферу в моделях СМІР5 в 1850-2005 гг. оказывается неопределённым даже по знаку, несмотря на общий протокол постановки численных экспериментов с этими моделями (Kloster, Lasslop, 2017). При этом, подобно полученному в рамках проекта FireMIP, выявляется очень высокая чувствительность модельных результатов к деталям задания землепользования. Для версии КМ ИФА РАН с учётом влияния плотности населения на развитие ПП отмечается немотонное изменение площади выгорания и эмиссий углерода в атмосферу в 1850-2005 гг. Уточнение интенсивности внешних воздействий на Земную систему в рамках проекта СМІР6 (следующая фаза проекта СМІР) привело к монотонному уменьшению глобальной площади выгорания в этой модели (рис. 4).

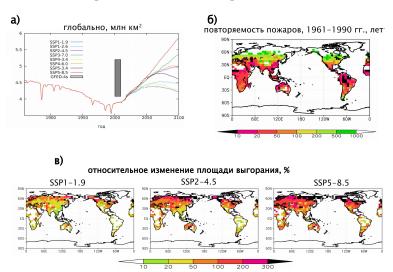


Рисунок 4. Характеристики природных пожаров по расчётам с КМ ИФА РАН а) глобальная площадь выгорания, б) повторяемость пожаров в современный период, в) относительное изменение площади выгорания от 1961-1990 гг. к 2090-2100 гг.

Figure 4. Characteristics of natural fires in the simulations with the IAPRAS model
Upper left: the global burnt area; upper right: the present-day fire return interval; lower: the relative
change of the burnt area from 1961-1990 to 2090-2100

В XXI веке по расчётам с МЗС ансамбля СМІР5 пожарная активность в целом увеличивается. Однако при этом уже выявляется принципиальная зависимость от интенсивности внешнего воздействия на Земную систему. В частности, если при сценарии умеренного антропогенного воздействия RCP (Representative Concentration Pathways) 4.5 во всех моделях глобальные эмиссии углерода в атмосферу из-за ПП увеличиваются на протяжении XXI века, то при сценарии сильных антропогенных воздействий RCP 8.5 в ряде моделей уменьшается. Причины последнего не установлены (Kloster, Lasslop, 2017). Отметим, что в КМ ИФА РАН глобальные и региональные эмиссии углерода в атмосферу из-за ПП увеличиваются в XXI веке при всех сценариях RCP с увеличением содержания углекислого газа в атмосфере (Елисеев и др., 2014, 2017; Eliseev et al., 2014). Это же справедливо и для расчётов со сценариями SSP (Shared Socioeconomic Pathways) (Gidden et al., 2019), которые используются в рамках проекта СМІР6 (рис. 4). Неопределённость оценок будущих изменений характеристик ПП может быть уменьшена за счёт проведения численных экспериментов в ансамблевой форме с выборкой значений определяющих параметров внутри предписанных интервалов и последующим анализом реалистичности отдельных реализаций внутри ансамбля (Eliseev et al., 2014). Однако и при этом интервалы неопределённости получаемых результатов оказывается весьма широким, так что, например, эти интервалы перекрываются между разными сценариями RCP.

В (Вücher et al., 2014) с использованием МЗС промежуточной сложности СLIMBA (включающей в себя JSBACH в качестве схемы процессов в деятельном слое суши) проведён расчёт изменений характеристик ПП для последних 8 тыс. лет с учётом физических воздействий на Земную систему (параметров орбиты Земли, содержания в атмосфере аэрозолей и хорошо перемешанных парниковых газов; изменение солнечной постоянной при этом не учитывалось) и интерактивным смещением границ распространения типов растительности, но без учёта влияния землепользования. В этих расчётах активность ПП увеличивается на протяжении интегрирования модели в тропиках, а также в более высоких широтах Южного полушария. В средних широтах Северного полушария соответствующее усиление отмечено в Северной Америке, тогда в большей части Евразии активность ПП уменьшалась. Полученные с моделью изменения характеристик ПП в целом согласуются с данными отложений древесного угля.

В (Bücher et al., 2014) предположено, что согласие между моделью и данными реконструкций может быть улучшено учётом влияния землепользования (в частности, пожаров с целью освобождения земель под сельскохозяйственные угодья). Учёт землепользования (а также учёт изменения солнечной постоянной), наряду с другими внешними воздействиями, был осуществлён в численном эксперименте с КМ ИФА РАН (Мохов и др., 2020). В целом полученные с КМ ИФА РАН результаты согласуются с результатами по модели CLIMBA, что позволяет сделать вывод о непринципиальном вкладе землепользования в изменение характеристик ПП в доиндустриальном голоцене на тысячелетних временных масштабах.

В связи с последним следует иметь в виду, что, по крайней мере в последние несколько тысячелетий доиндустриального голоцена отмечалось общее похолодание климата (напр., (Climate Change..., 2013, рис. 5.3)). С учётом і) усиления активности ПП при общем похолодании климата в этот период, іі) усиления этой активности в XXI веке в модельных расчётах при сильном глобальном потеплении и ііі) отмеченной выше положительной корреляции активности ПП с температурой в стадиалах и межстадиалах плейстоцена, затруднительно сделать общий вывод об о связи хотя бы знака изменений характеристик ПП с изменением температуры относительно современной эпохи.

Выводы

Природные пожары играют важную роль в динамике экосистем и в глобальных биогеохимических циклах. В представленной статье проведён обзор известных сведений о природных пожарах и анализ современных подходов к моделированию ПП. При этом особое внимание уделено вопросам включения моделей ПП в глобальные модели Земной системы и полученным результатам моделирования.

В современный период в мониторинге природных пожаров основную роль играют спутниковые данные. Тем не менее, источниками информации о связанных с ПП процессами также служат натурные и лабораторные эксперименты. Вариации характеристик природных пожаров для климатических эпох прошлого могут быть получены как из архивов лесных служб, так и реконструированы по ряду прокси-данных, прежде всего отложений древесного угля.

В последние годы появилась возможность идентификации даже небольших пожаров (с размером $< 500 \, \mathrm{m}$) в спутниковых данных. Тем не менее, сохраняется значительная неопределённость оценок площади выгорания изза ПП, а также связанных с ними эмиссий веществ в атмосферу. По наиболее представительным спутниковым данным (массив GFED-4.1) ежегодная площадь выгорания из-за пожаров близка к 5 млн км², в том числе не менее 2.9 млн км² из-за собственно природных пожаров. Это приводит к эмиссиям углерода $\sim 2 \, \mathrm{TrC} \, \mathrm{rog}^{-1}$, в основном в виде CO_2 . На территории России ежегодная площадь выгорания близка к 135 тыс. км² с ежегодным выделением в атмосферу $0.12 \, \mathrm{TrC} \, \mathrm{rog}^{-1}$. Эти оценки заметно превышают соответствующие оценки Национального доклада о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990-2015 гг.

Характеристики ПП изменяются при межгодовых вариациях климата, в том числе в годы Эль-Ниньо. По спутниковым данным для последних десятилетий на масштабах от глобального до субконтинентального значимых трендов характеристик ПП не выявлено. Кроме того, по прокси-данным и модельным расчётам выявляются общая интенсификация активности ПП в доиндустриальном голоцене (в том числе при похолодания климата), а также общее увеличение этой активности от холодных стадиалов плейстоцена к тёплым межстадиалам.

В настоящее время схемы расчёта характеристик ПП внедряются в модели Земной системы. Современные такие схемы учитывают погодные и/или климатические характеристики развития пожаров, количество возгораний в зависимости от характеристик молниевой активности и плотности населения (а иногда и от структурных особенностей экономики и её развития), ликвидацию пожаров соответствующими службами, количество и тип топлива для пожаров, полноту сгорания топлива. Ряд моделей способны воспроизводить динамику отдельных пожаров в упрощённой форме. Однако недостаточность современных знания о ПП приводит к заметному межмодельному различию даже для воспроизведеения многолетних средних характеристик ПП, а также для коэффициентов тренда изменения этих характеристик. В частности, для XX века основные межмодельные различия в изменениях характеристик активности ПП обусловлены предположениями о влиянии землепользования на динамику ПП. Таким образом, требуется дальнейшее развитие этих моделей и уточнение их определяющих параметров. В свою очередь, в численных экспериментах с МЗС необходим адекватный учёт неопределённости, связанной с недостаточными знаниями о связанных с пожарами процессах и недостатками самих численных моделей Земной системы.

Благодарности

Авторы выражают глубокую признательность анонимному рецензенту за высказанные замечания, позволившие значительно улучшить данный обзор. Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-05-00087-а, 17-29-05098-офи_м, 18-35-20031 мол_а_вед, 17-29-05102 офи_м, 18-35-00682 мол_а, а также в рамках темы № 01200408543 физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Список литературы

Анисимов О.А., Борщ С.В., Георгиевский В.Ю., Инсаров Г.Э., Кобышева Н.В., Костяной А.Г., Кренке А.Н., Семенов С.М., Сиротенко О.Д., Шерстюков Б.Г., Фролов И.Е., Хлебникова Е.И., Ананичева М.Д., Болгов М.В., Анохин Ю.А., Асарин А.Е., Асмус В.В., Борисова О.К., Величко А.А., Григорьев А.В., Гудкович З.М., Демченко П.Ф., Карклин В.П., Карклин В.П., Кислов А.В., Клячкин С.В., Корзухин М.Д., Кровотынцев В.А.3, Крупчатников В.Н., Кудеяров В.Н., Лавров С.А., Лебедев С.А., Малкова Г.В., Минин А.А., Мяч Л.Т., Никонова Р.Е., Носенко Г.А., Ольчев А.В., Павлов А.В., Павлова В.Н., Павлова Т.В., Полунин А.Я., Попова В.В., Попова Е.Н., Поповнин В.В., Романовский В.А., Сирин А.А., Смоляницкий В.М., Сперанская Н.А., Стрелецкий Д.А., Терзиев Ф.С., Филиппов Ю.Г., Фролов С.В., Харук В.И., Холодов А.Л., Хромова Т.Е., Шалыгин А.Л., Шикломанов Н.И., Шмакин А.Б. 2012. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. – М., НИЦ "Планета", 512 с.

Барталев С.А., Стыценко Ф.В., Егоров В.А., Лупян Е.А. 2015. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров. – Лесоведение, № 2, с. 83-94.

Бондур В.Г., Гинзбург А.С. 2016. Эмиссия углеродсодержащих газов и аэрозолей от природных пожаров на территории России по данным космического мониторинга. — Доклады Академии наук, т. 466, № 4, с. 473-477. Doi:10.7868/S0869565216040186.

Бондур В.Г., Гордо К.А., Кладов В.Л. 2016. Пространственно-временные распределения площадей природных пожаров и эмиссий углеродсодержащих газов и аэрозолей на территории Северной Евразии по данным космического мониторинга. — Исследование Земли из космоса, № 6, с. 3-20. Doi:10.7868/S0205961416060105.

Васильева А.В. 2012. Влияние природных пожаров на крупномасштабную изменчивость поля приземного СО в Северной Евразии. — Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. — М., Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, 155 с.

Вивчар А.В., Моисеенко К.Б., Панкратова Н.В. 2010. Оценки эмиссий оксида углерода от природных пожаров в северной Евразии в приложении к задачам регионального атмосферного переноса и климата. — Известия РАН, Физика атмосферы и океана, т. 46, № 3, с. 307-320.

Виноградова А.А., Васильева А.В. 2017. Черный углерод в воздухе северных районов России: источники, пространственные и временные вариации. — Оптика атмосферы и океана, т. 30, № 6, с. 467-475. Doi:10.15372/AOO20170604.

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. Doi:10.15372/AOO20150603/.

Гришин А.М. 1981. Математические модели лесных пожаров. – Томск, Издательство Томского университета, 277 с.

Гришин А.М. 1992. Математические модели лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. – Новосибирск, Наука, 408 с.

Гришин А.М. 1994. Физика лесных пожаров. – Томск, Изд-во ТГУ, 218 с.

Гришин А.М., Долгов А.А., Зима В.П., Рейно В.В., Цвык Р.Ш. 1997. Тепловизионные исследования развития и распространения низового лесного пожара. — Оптика атмосферы и океана, т. 10, № 10, с. 1139-1150.

Елисеев А.В. 2011. Оценка изменения характеристик климата и углеродного цикла в XXI веке с учётом неопределённости значений параметров наземной биоты. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, т. 47, № 2, с. 147-170.

Елисеев А.В. 2017. Глобальный цикл CO_2 : основные процессы и взаимодействие с климатом. — Фундаментальная и прикладная климатология, т. 4, с. 9-31.

Елисеев А.В. 2018. Глобальный цикл метана: обзор. — Фундаментальная и прикладная климатология, т. 1, с. 52-70.

Елисеев А.В., Мохов И.И., Чернокульский А.В. 2014. Влияние низовых и торфяных пожаров на эмиссии CO_2 в атмосферу. – Доклады Академии наук, т. 459, \mathbb{N}_2 4, с. 496-500.

Елисеев А.В., Мохов И.И., Чернокульский А.В. 2017. Влияние молниевой активности и антропогенных факторов на крупномасштабные характеристики природных пожаров. – Известия РАН. Физика атмосферы и океана, т. 53, № 1, с. 3-14.

Мелехов И.С. 1947. Природа леса и лесные пожары. – Архангельск, Объединение государственных книжно-журнальных издательств, 44 с.

Мелехов И.С. 1978. Лесная пирология. – М., Московский лесотехнический институт, 71 с.

Мохов И.И., Елисеев А.В. 2012. Моделирование глобальных климатических изменений в XX-XXIII веках при новых сценариях антропогенных воздействий RCP. – Доклады Академии наук, т. 443, № 6, с. 732-736.

Мохов И.И., Елисеев А.В., Гурьянов В.В. 2020. Модельные оценки глобальных и региональных изменений климата в голоцене. — Доклады Академии наук, т. 490, № 1, с. 27-32. Doi:10.31857/S2686739720010065.

Мохов И.И., Чернокульский А.В. 2010. Региональные модельные оценки риска лесных пожаров в азиатской части России при изменениях климата. – География и природные ресурсы, № 2, с. 120-126.

НДК. 2017. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990-2015 гг. Часть 1. – М., Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), 471 с.

Нестеров В.Г. 1949. Горимость леса и методы ее определения. – М., Л., Гослесбумиздат, 76 с.

Обязов В.А. 2012. Влияние изменений метеорологических условий на лесопожарную обстановку в Забайкальском крае. — Метеорология и гидрология, N 6, с. 27-35.

Пономарев Е.И., Швецов Е.Г. 2013. Характеристики категорий пожаров растительности в Сибири по данным спутниковых и других наблюдений. – Исследование Земли из космоса, № 5, с. 45-54. Doi:10.7868/S0205961413050035.

Ракитин В.С., Еланский Н.Ф., Панкратова Н.В., Скороход А.И., Джола А.В., Штабкин Ю.А., Ван П., Ван Г.Ч., Васильева .В., Макарова М.В., Гречко Е.И. 2017. Исследование трендов общего содержания СО и СН₄ над Евразией на основе анализа наземных и орбитальных спектроскопических измерений. — Оптика атмосферы и океана, т. 30, № 6, с. 449-456. Doi:10.15372/AOO20170601.

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 годы. – Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, т. XXVII, № 1, с. 27-45. Doi:10.21513/0207-2016-1-27-48.

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, N 7, с. 5-17.

Софронов М.А., 1967. Лесные пожары в горах Южной Сибири. – М., Наука, 152 с.

Суркова Г.В. 2002. Химия атмосферы. – М., Изд-во МГУ, 210 с.

Швиденко А.З., Щепащенко Д.Г. 2013. Климатические изменения и лесные пожары в России. – Лесоведение, № 5, с. 50-61.

Akagi S.K., Yokelson R.J., Wiedinmyer C., Alvarado M.J., Reid J.S., Karl T., Crounse J.D., Wennberg P.O. 2011. Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models. – Atmospheric Chemistry and Physics, vol. 11, No. 9, pp. 4039-4072. Doi:10.5194/acp-11-4039-2011.

Alonso-Canas I., Chuvieco E. 2015. Global burned area mapping from ENVISATMERIS and MODIS active fire data. – Remote Sensing of Environment, vol. 163, pp. 140-152. Doi:10.1016/j.rse.2015.03.011.

Andela N., Morton D.C., Giglio L., Paugam R., Chen Y., Hantson S., van der Werf G.R., Randerson J.T. 2019. The Global Fire Atlas of individual fire size, duration, speed and direction. – Earth System Science Data, vol. 11, No. 2, pp. 529-552. Doi:10.5194/essd-11-529-2019.

Andreae M.O. 2019. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning - an updated assessment. – Atmospheric Chemistry and Physics, vol. 19, No. 13, pp. 8523-8546. Doi:10.5194/acp-19-8523-2019.

Andreae M.O., Merlet P. 2001. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. – Global Biogeochemical Cycles, vol. 15, No. 4, pp. 955-966. Doi:10.1029/2000GB001382.

Arora V.K., Boer G.J. 2005. Fire as an interactive component of dynamic vegetation models. – Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, vol. 110, No. G2, G02008. Doi:10.1029/2005JG000042.

Arora V.K., Boer G.J., Friedlingstein P., Eby M., Jones C.D., Christian J.R., Bonan G., Bopp L., Brovkin V., Cadule P., Hajima T., Ilyina T., Lindsay K., Tjiputra J.F., Wu T. 2013. Carbon-concentration and carbon-climate feedbacks in CMIP5 Earth System Models. – Journal of Climate, vol. 26, No. 15, pp. 5289-5314. Doi:10.1175/JCLI-D-12-00494.1.

Chen Q., Farmer D.K., Schneider J., Zorn S.R., Heald C.L., Karl T.G., Guenther A., Allan J.D., Robinson N., Coe H., Kimmel J.R., Pauliquevis T., Borrmann S., Pöschl U., Andreae M.O., Artaxo P., Jimenez J.L., Martin S.T. 2009.

Mass spectral characterization of submicron biogenic organic particles in the Amazon Basin. – Geophysical Research Letters, vol. 36, No. 20, L20806. Doi:10.1029/2009GL039880.

Climate Change 2013: The Physical Science Basis. 2013. – Cambridge/New York: Cambridge University Press, 1535 p.

Conard S.G., Ivanova G.A. 1997. Wildfire in Russian boreal forests - potential impacts of fire regime characteristics on emissions and global carbon balance estimates. – Environmental Pollution, vol. 98, No. 3, pp. 305-313. Doi:10.1016/S0269-7491(97)00140-1.

Daniau A.-L., Harrison S.P., Bartlein P.J. 2010. Fire regimes during the Last Glacial. – Quaternary Science Reviews, vol. 29, No. 21, pp. 2918-2930. Doi:10.1016/j.quascirev.2009.11.008.

Eliseev A.V., Mokhov I.I. 2011. Uncertainty of climate response to natural and anthropogenic forcings due to different land use scenarios. – Advances in Atmospheric Sciences, vol. 28, No. 5, pp. 1215-1232. Doi:10.1007/s00376-010-0054-8.

Eliseev A.V., Mokhov I.I., Chernokulsky A.V. 2014. An ensemble approach to simulate CO₂ emissions from natural fires. – Biogeosciences, vol. 11, No. 12, pp. 3205-3223. Doi:10.5194/bg-11-3205-2014.

Ferek R.J., Reid J.S., Hobbs P.V., Blake D.R., Liousse C. 1998. Emission factors of hydrocarbons, halocarbons, trace gases, and particles from biomass burning in Brazil. – Journal of Geophysical Research, vol. 103, No. D24, pp. 32107-32118. Doi:10.1029/98JD00692.

Ganteaume A., Camia A., Jappiot M., San-Miguel-Ayanz J., Long-Fournel M., Lampin C. 2013. A review of the main driving factors of forest fire ignition over Europe. – Environmental Management, vol. 51, No. 3, pp. 651-662. Doi:10.1007/s00267-012-9961-z.

Gidden M.J., Riahi K., Smith S.J., Fujimori S., Luderer G., Kriegler E., van Vuuren D.P., van den Berg M., Feng L., Klein D., Calvin K., Doelman J.C., Frank S., Fricko O., Harmsen M., Hasegawa T., Havlik P., Hilaire J., Hoesly R., Horing J., Popp A., Stehfest E., Takahashi K. 2019. Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: a dataset of armonized emissions trajectories through the end of the century. – Geoscientific Model Development, vol. 12, No. 4, pp. 1443-1475. Doi:10.5194/gmd-12-1443-2019.

Giglio L., Randerson J.T., van der Werf G.R., Kasibhatla P.S., Collatz G.J., Morton D.C., DeFries R.S. 2010. Assessing variability and long-term trends in burned area by merging multiple satellite fire products. – Biogeosciences, vol. 7, No. 3, pp. 1171-1186. Doi:10.5194/bg-7-1171-2010.

Giglio L., Randerson J.T., van der Werf G.R. 2013. Analysis of daily, monthly, and annual burned area using the fourth-generation global fire emissions database (GFED4). – Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, vol. 118, No. 1, pp. 317-328. Doi:10.1002/jgrg.20042.

Goldammer J.G., Furyaev V.V. 1996. Fire in ecosystems of boreal Eurasia. – Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 531 p.

Grishin A.M., Filkov A.I., Loboda E.L., Kuznetsov V.T., Kasymov D.P., Andreyuk S.M., Ivanov A.I., Stolyarchuk N.D., Reyno V.V., Kozlov A.V. 2014. A field experiment on grass fire effects on wooden constructions and peat layer ignition. – International Journal of Wildland Fire, vol. 23, No. 3, pp. 445-449.

Guo M., Li J., Xu J., Wang X., He H., Wu L. 2017. CO₂ emissions from the 2010 Russian wildfires using GOSAT data. – Environmental Pollution, vol. 226, pp. 60-68. Doi:10.1016/j.envpol.2017.04.014.

Hantson S., Arneth A., Harrison S.P., Kelley D.I., Prentice I.C., Rabin S.S., Archibald S., Mouillot F., Arnold S.R., Artaxo P., Bachelet D., Ciais P., Forrest M., Friedlingstein P., Hickler T., Kaplan J.O., Kloster S., Knorr W., Lasslop G., Li F., Mangeon S., Melton J.R., Meyn A., Sitch S., Spessa A., van der Werf G.R., Voulgarakis A., Yue C. 2016. The status and challenge of global fire modellingto – Biogeosciences, vol. 13, No. 11, pp. 3359-3375. Doi:10.5194/bg-13-3359-2016.

Hantson S., Kelley D.I., Arneth A., Harrison S.P., Archibald S., Bachelet D., Forrest M., Hickler T., Lasslop G., Li F., Mangeon S., Melton J.R., Nieradzik L., Rabin S.S., Prentice I.C., Sheehan T., Sitch S., Teckentrup L., Voulgarakis A., Yue C. 2020. Quantitative assessment of fire and vegetation properties in simulations with fire-enabled vegetation models from the Fire Model Intercomparison Project – Geoscientific Model Development, vol. 13, No. 7, p. 3299-3318. Doi:10.5194/gmd-13-3299-2020.

Harrison S.P., Bartlein P.J., Brovkin V., Houweling S., Kloster S., Prentice I.C. 2018. The biomass burning contribution to climate-carbon-cycle feedback. – Earth System Dynamics, vol. 9, No. 2, pp. 663-677. Doi:10.5194/esd-9-663-2018.

Holgate C.M., van Dijk A.I.J.M., Cary G.J., Yebra M. 2017. Using alternative soil moisture estimates in the McArthur Forest Fire Danger Index. – International Journal of Wildland Fire, vol. 26, No. 9, pp. 806-819. Doi:10.1071/WF16217.

Humber M.L., Boschetti L., Giglio L., Justice C.O. 2019. Spatial and temporal intercomparison of four global burned area products. – International Journal of Digital Earth, vol. 12, No. 4, pp. 460-484. Doi:10.1080/17538947.2018.1433727.

Jones M.W., Santín C., van der Werf G.R., Doerr S.H. 2019. Global fire emissions buffered by the production of pyrogenic carbon. – Nature Geosciences, vol. 12, No. 742-747. Doi:10.1038/s41561-019-0403-x.

Kasischke E.S., Hyer E.J., Novelli P.C., Bruhwiler L.P., French N.H.F., Sukhinin A.I., Hewson J.H., Stocks B.J. 2005. Influences of boreal fire emissions on Northern Hemisphere atmospheric carbon and carbon monoxide. — Global Biogeochemical Cycles, vol. 19, No. 1, GB1012. Doi:10.1029/2004GB002300.

Kaufman Y.J., Justice C.O., Flynn L.P., Kendall J. D., Prins E.M., Giglio L., Ward D.E., Menzel W. P., Setzer A.W. 1998. Potential global fire monitoring from EOS-MODIS. – Journal of Geophysical Research: Atmospheres, vol. 103, No. D24, pp. 32215-32238. Doi:10.1029/98JD01644.

Kloster S., Lasslop G. 2017. Historical and future fire occurrence (1850 to 2100) simulated in CMIP5 Earth System Models. – Global and Planetary Change, vol. 150, pp. 58-69. Doi:10.1016/j.gloplacha.2016.12.017.

Kloster S., Mahowald N.M., Randerson J.T., Lawrence P.J. 2012. The impacts of climate, land use, and demography on fires during the 21st century simulated by CLM-CN. – Biogeosciences, vol. 9, No. 1, pp. 509-525. Doi:10.5194/bg-9-509-2012.

Kloster S., Mahowald N.M., Randerson J.T., Thornton P.E., Hoffman F.M., Levis S., Lawrence P.J., Feddema J.J., Oleson K.W., Lawrence D.M. 2010. Fire dynamics during the 20th century simulated by the Community Land Model. – Biogeosciences, vol. 7, No. 6, pp. 1877-1902. Doi:10.5194/bg-7-1877-2010.

Konovalov I.B., Beekmann M., Kuznetsova I.N., Yurova A., Zvyagintsev A.M. 2011. Atmospheric impacts of the 2010 Russian wildfires: integrating modelling and measurements of an extreme air pollution episode in the Moscow region. – Atmospheric Chemistry and Physics, vol. 11, No. 11, pp. 10031-10056. Doi:10.5194/acp-11-10031-2011.

Lasslop G., Brovkin V., Reick C.H., Bathiany S., Kloster S. 2016. Multiple stable states of tree cover in a global land surface model due to a fire-vegetation feedback. — Geophysical Research Letters, vol. 43, No. 12, pp. 6324-6331. Doi:10.1002/2016GL069365.

Lasslop G., Coppola A.I., Voulgarakis A., Yue C., Veraverbeke S., 2019. Influence of fire on the carbon cycle and climate. – Current Climate Change Reports, vol. 5, No. 2, pp. 112-123. Doi:10.1007/s40641-019-00128-9.

Lasslop G., Thonicke K., Kloster S. 2014. SPITFIRE within the MPI Earth system model: Model development and evaluation. – Journal of Advances in Modeling Earth Systems, vol. 6, No. 3, pp. 740-755. Doi:10.1002/2013MS000284.

Lawrence D.M., Fisher R.A., Koven C.D., Oleson K.W., Swenson S.C., Bonan G., Collier N., Ghimire B., van Kampenhout L., Kennedy D., Kluzek E., Lawrence P.J., Li F., Li H., Lombardozzi D., Riley W.J., Sacks W.J., Shi M., Vertenstein M., Wieder W.R., Xu C., Ali A.A., Badger A.M., Bisht G., van den Broeke M., Brunke M.A., Burns S.P., Buzan J., Clark M., Craig A., Fisher J.B., Flanner M., Drewniak B., Dahlin K.. Fox A.M., Hoffman F., Keppel-Aleks G., Knox R., Kumar S., Lenaerts J., Leung L.R., Lipscomb W.H., Lu Y., Pandey A., Pelletier J.D., Perket J., Randerson J.T., Ricciuto D.M., Sanderson B.M., Slater A., Subin Z.M., Tang J., Thomas R.Q., Val Martin M., Zeng X. 2019. The Community Land Model version 5: Description of new features, benchmarking, and impact of forcing uncertainty. – Journal of Advances in Modeling Earth Systems, vol. 11, No. 12, pp. 4245-4287. Doi:10.1029/2018MS001583.

Li F., Lawrence D.M. 2017. Role of fire in the global land water budget during the twentieth century due to changing ecosystems. – Journal of Climate, vol. 30, No. 6, pp. 1893-1908. Doi:10.1175/JCLI-D-16-0460.1.

- Li F., Lawrence D.M., Bond-Lamberty B. 2017. Impact of fire on global land surface air temperature and energy budget for the 20th century due to changes within ecosystems. Environmental Research Letters, vol. 12, No. 4, p. 044014. Doi:10.1088/1748-9326/aa6685.
- Li F., Zeng X.D., Levis S. 2012. A process-based fire parameterization of intermediate complexity in a Dynamic Global Vegetation Model. Biogeosciences, vol. 9, No. 7, pp. 2761-2780. Doi:10.5194/bg-9-2761-2012.
- Liu Z., Ballantyne A.P., Cooper L.A. 2018. Increases in land surface temperature in response to fire in Siberian boreal forests and their attribution to biophysical processes. Geophysical Research Letters, vol. 45, No. 13, pp. 6485-6494. Doi:10.1029/2018GL078283.
- Mangeon S., Voulgarakis A., Gilham R., Harper A., Sitch S., Folberth G. 2016. INFERNO: a fire and emissions scheme for the UK Met Office's Unified Model. Geoscientific Model Development, vol. 9, No. 8, pp. 2685-2700. Doi:10.5194/gmd-9-2685-2016.
- Marlon J.R., Bartlein P.J., Carcaillet C., Gavin D.G., Harrison S.P., Higuera P.E., Joos F., Power M.J., Prentice I.C. 2008. Climate and human influences on global biomass burning over the past two millennia. Nature Geosciences, vol. 1, No. 10, pp. 697-702. Doi:10.1038/ngeo313.
- Marlon J.R., Kelly R., Daniau A.-L., Vannière B., Power M.J., Bartlein P., Higuera P., Blarquez O., Brewer S., Brücher T., Feurdean A., Romera G.G., Iglesias V., Maezumi S.Y., Magi B., Courtney Mustaphi C.J., Zhihai T. 2016. Reconstructions of biomass burning from sediment-charcoal records to improve data-model comparisons. Biogeosciences, vol. 13, No. 11, pp. 3225-3244. Doi:10.5194/bg-13-3225-2016.
- McArthur A.G. 1967. Fire behaviour in eucalypt forests. Canberra, Commonwealth of Australia, 36 p.
- Mezuman K., Tsigaridis K., Faluvegi G., Bauer S.E. 2020. The interactive global fire module pyrE (v1.0) Geoscientific Model Development, vol. 13, No. 7, pp. 3091-3118. Doi:10.5194/gmd-13-3091-2020.
- Pechony O., Shindell D.T. 2009. Fire parameterization on a global scale. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, vol. 114, No. D16, D16115. Doi:10.1029/2009JD011927.
- Pellegrini A.F.A., Ahlström A., Hobbie S.E., Reich P.B., Nieradzik L.P., Staver A.C., Scharenbroch B.C., Jumpponen A., Anderegg W.R.L., Randerson J.T., Jackson R.B. 2018. Fire frequency drives decadal changes in soil carbon and nitrogen and ecosystem productivity. Nature, vol. 553, No. 7687, pp. 194-198. Doi:10.1038/nature24668.
- Pfeiffer M., Spessa A., Kaplan J.O. 2013. A model for global biomass burning in preindustrial time: LPJ-LMfire (v1.0). Geoscientific Model Development, vol. 6, No. 3, pp. 643-685. Doi:10.5194/gmd-6-643-2013

Marlon J., Ortiz N., Bartlein P.J., Harrison S.P., Mayle F.E., Power M.J., Bradshaw R.H.W., Carcaillet C., Cordova C., Ballouche A., Mooney S., Moreno P.I., Prentice I.C., Thonicke K., Tinner W., Whitlock C., Zhang Y., Zhao Y., Ali A.A., Anderson R.S., Beer R., Behling H., Briles C., Brown K.J., Brunelle A., Bush M., Camill P., Chu G.Q., Clark J., Colombaroli D., Connor S., Daniau A.-L., Daniels M., Dodson J., Doughty E., Edwards M.E., Finsinger W., Foster D., Frechette J., Gaillard M.-J., Gavin D.G., Gobet E., Hallett D.J., Higuera P., Hope G., Horn S., Inoue J., Kaltenrieder P., Kennedy L., Kong Z.C., Larsen C., Long C.J., Lynch J., Lynch E.A., McGlone M., Meeks S., Mensing S., Meyer G., Minckley T., Mohr J., Nelson D.M., New J., Newnham R., Noti R., Oswald W., Pierce J., Richard P.J.H., Rowe C., Sanchez Goñi M.F., Shuman B.N., Takahara H., Toney J., Turney C., Urrego-Sanchez D.H., Umbanhowar C., Vandergoes M., Vanniere B., Vescovi E., Walsh M., Wang X., Williams N., Wilmshurst J., Zhang J.H. 2015. Changes in fire regimes since the Last Glacial Maximum: an assessment based on a global synthesis and analysis of charcoal data. - Climate Dynamics, vol. 30, No. 7-8, pp. 887-907. Doi:10.1007/ s00382-007-0334-x.

Randerson J.T., Chen Y., van der Werf G.R., Rogers B.M., Morton D.C. 2012. Global burned area and biomass burning emissions from small fires. – Journal Geophysical Research: Biogeosciences, vol. 117, No. G4, G04012. Doi:10.1029/2012JG002128.

Romanovskaya A.A., Korotkov V.N., Polumieva P.D., Trunov A.A., Vertyankina V.Yu., Karaban R.T. 2020. Greenhouse gas fluxes and mitigation potential for managed lands in the Russian Federation – Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, vol. 25, No. 4, pp. 661-687. Doi:10.1007/s11027-019-09885-2.

Rothermel R.C. 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. – Ogden: U.S. Department of Agriculture, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 40 p.

Roy D.P., Jin Y., Lewis P.E., Justice C.O. 2005. Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data. – Remote Sensing of Environment, vol. 7, No. 2, p. 137-162. Doi:10.1016/j.rse.2005.04.007.

Seiler W., Crutzen P.J. 1980. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning. – Climatic Change, vol. 2, No. 3, pp. 207-247. Doi:10.1007/BF00137988.

Soja A.J., Cofer W.R., Shugart H.H., Sukhinin A.I., Stackhouse P.W., McRae D.J., Conard S.G. 2004. Estimating fire emissions and disparities in boreal Siberia (1998-2002). – Journal of Geophysical Research, vol. 109, No. D14, D14S06. Doi:10.1029/2004JD004570.

Stocks B.J., Mason J.A., Todd J.B., Bosch E.M., Wotton B.M., Amiro B.D., Flannigan M.D., Hirsch K.G., Logan K.A., Martell D.L., Skinner W.R. 2002. Large forest fires in Canada, 1959-1997. – Journal Geophysical Research: Atmospheres, vol. 107, No. D1, 8149. Doi:10.1029/2001JD000484.

Sullivan A.L. 2009a. Wildland surface fire spread modelling, 1990-2007. 1: Physical and quasi-physical models. – International Journal Wildland Fire, vol. 18, No. 4, pp. 349-368. Doi:10.1071/WF06143

Sullivan A.L. 2009b. Wildland surface fire spread modelling, 1990-2007. 2: Empirical and quasi-empirical models. – International Journal Wildland Fire, vol. 18, No. 4, pp. 369-386. Doi:10.1071/WF06142

Sullivan A.L. 2009c. Wildland surface fire spread modelling, 1990-2007. 3: Simulation and mathematical analogue models. – International Journal Wildland Fire, vol. 18, No. 4, pp. 387-403. Doi:10.1071/WF0614.

Tansey K., Grégoire J., Defourny P., Leigh R., Pekel J., van Bogaert E., Bartholomé E. 2008. A new, global, multi-annual (2000-2007) burnt area product at 1 km resolution. — Geophysical Research Letters, vol. 35, No. 1, L01401. Doi:10.1029/2007GL031567.

Teckentrup L., Harrison S.P., Hantson S., Heil A., Melton J.R., Forrest M., Li F., Yue C., Arneth A., Hickler T., Sitch S., Lasslop G. 2019. Response of simulated burned area to historical changes in environmental and anthropogenic factors: a comparison of seven fire models. – Biogeosciences, vol. 16, No. 19, pp. 3883-3910. Doi:10.5194/bg-16-3883-2019.

Thonicke K., Spessa A., Prentice I.C., Harrison S.P., Dong L., Carmona-Moreno C. 2010. The influence of vegetation, fire spread and fire behaviour on biomass burning and trace gas emissions: results from a process-based model. – Biogeosciences, vol. 6, pp. 1991-2011. Doi:10.5194/bg-7-1991-2010.

Thonicke K., Venevsky S., Sitch S., Cramer W. 2001. The role of fire disturbance for global vegetation dynamics: coupling fire into a Dynamic Global Vegetaion Model. – Global Ecology and Biogeography, vol. 10, No. 6, pp. 661-677. Doi:10.1046/j.1466-822X.2001.00175.x.

van der Werf G.R., Randerson J.T., Collatz G.J., Giglio L., Kasibhatla P.S., Arellano A.F., Olsen S.C., Kasischke E.S. 2004. Continental-scale partitioning of fire emissions during the 1997 to 2001 El Niño/La Niña period. – Science, vol. 303, No. 5654, pp. 73-76. Doi:10.1126/science.1090753.

van der Werf G.R., Randerson J.T., Giglio L., Collatz G.J., Mu M., Kasibhatla P.S., Morton D.C., DeFries R.S., Jin Y., van Leeuwen T.T. 2010. Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997-2009). – Atmospheric Chemistry and Physics, vol. 10, No. 23, pp. 11707-11735. Doi:10.5194/acp-10-11707-2010.

van der Werf G.R., Randerson J.T., Giglio L., van Leeuwen T.T., Chen Y., Rogers B.M., Mu M., van Marle M.J.E., Morton D.C., Collatz G.J., Yokelson R.J., Kasibhatla P.S. 2017. Global fire emissions estimates during 1997-2016. – Earth System Science Dynamics, vol. 9, No. 2, pp. 697-720. Doi:10.5194/essd-9-697-2017.

Vasileva A.V., Moiseenko K.B., Mayer J.-C., Jurgens N., Panov A., Heimann M., Andreae M.O. 2011. Assessment of the regional atmospheric impact

of wildfire emissions based on CO observations at the ZOTTO tall tower station in central Siberia. – Journal of the Geophysical Research: Atmopsheres. vol. 116, No. D7, D07301. Doi:10.1029/2010JD014571.

Vasileva A., Moiseenko K. 2013. Methane emissions from 2000 to 2011 wildfires in Northeast Eurasia estimated with MODIS burned area data. – Atmospheric Environment, vol. 71, pp. 115-121. Doi:10.1016/j.atmosenv.2013.02.001.

Venevsky S., Thonicke K., Sitch S., Cramer W. 2002. Simulating fire regimes in human-dominated ecosystems: Iberian Peninsula case study. — Global Change Biology, vol. 8, No. 10, pp. 984-998. Doi:10.1046/j.1365-2486.2002.00528.x.

Vivchar A. 2011. Wildfires in Russia in 2000-2008: estimates of burnt areas using the satellite MODIS MCD45 data. – Remote Sensing Letters, vol. 2, No. 1, pp. 81-90. Doi:10.1080/01431161.2010.499138.

Whelan R.J. 1995. The ecology of fire. – Cambridge, Cambridge University Press, Cambridge, 346 p.

Yokelson R.J., Christian T. J., Karl T. G., Guenther A. 2008. The tropical forest and fire emissions experiment: laboratory fire measurements and synthesis of campaign data. – Atmospheric Chemistry and Physics, vol. 8, No. 13, pp. 3509-3527. Doi:10.5194/acp-8-3509-2008.

Yue C., Ciais P., Cadule P., Thonicke K., Archibald S., Poulter B., Hao W.M., Hantson S., Mouillot F., Friedlingstein P., Maignan F., Viovy N. 2014. Modelling the role of fires in the terrestrial carbon balance by incorporating SPITFIRE into the global vegetation model ORCHIDEE - Part 1: simulating historical global burned area and fire regimes. – Geoscientific Model Development, vol. 7, No. 6, pp. 2747-2767. Doi:10.5194/gmd-7-2747-2014.

Статья поступила в редакцию: 02.05.2020 г. После переработки:21.10.2020 г.

NATURAL FIRES: OBSERVATIONAL DATA AND MODELLING

A.V. Eliseev $^{(1),2),3)*$, A.V. Vasileva $^{(2)}$

Lomonosov Moscow State University,
 1,bld.2, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russian Federation;
 * corresponding author: eliseev@ifaran.ru

²⁾ A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, 3, Pyzhevsky, 119017, Moscow, Russian Federation

> ³⁾ Kazan Federal University, 5, Tovarishcheskaya, 420097, Kazan, Russian Federation

Abstract. A review of the contemporary knowledge on natural fires (NF) and on contemporary approaches for their modelling is presented. The review is targeted to the implementation of NF models into the global Earth system models.

In the last years, satellite retrievals are able to detect even small (with the size $<500~\rm m$) fires. Nonetheless, marked uncertainties of the estimates for the burned are and for the NF-associated release of different substances into the atmosphere still persist. For the most detailed satellite dataset GFED-4.1, the annual burned area is close to 5 mln km², including at least 2.9 Mkm² due to NF themselves. This leads to the carbon release of $\sim\!\!2$ PgC year into the atmosphere, mostly in the form of CO2.In the Russian territory, the annual burned area is close to 135 thnd km², and the annual carbon release into the atmosphere is equal to 0.12 PgC year. These estimates appear much larger the respective estimates reported in the Russian National Report for 1900-2015.

NF Characteristics follow the interannual climate variability, including that in the El Niño years. Nevertheless, no significant trends are found at the global and subcontinental spatial scales based on the satellite data. Proxy data and modelling results exhibit a general increase of the NF activity during the preindustrial Holocene (including cold epochs) as well as an overall enhancement of this activity from cold stadials to warm interstadials in the Pleistocene.

Currently the NF simulation modules are started to be implemented into the Earth system models. These modules take into account fire-affecting weather and/ or climate characteristics, the number of ignitions depending on lightning activity and population density (sometimes, depending on landuse type as well), fire suppression, amount and type of fuel for fires, and combustion completeness. A number of models is able to simulate even the simplified dynamics of individual fires. However, the limited contemporary knowledge on NF leads to the marked intermodel scatter even in the simulated climatology of the NF characteristics and in the simulated trend slopes of such characteristics. In particular, the intermodel differences in the 20th century variations in the simulated NF characteristics are mostly caused by the implemented assumptions on the landuse impact on NF dynamics. As a result, further development of the NF modules is needed.

Keywords. Natural fires, Earth system models, climate changes, satellite data, emissions into the atmosphere, carbon budget, aerosols, methane, biosphere-atmosphere interaction.

References

Anisimov O.A., Borshch S.V., Georgievskij V.Yu., Insarov G.E., Kobysheva N.V., Kostyanoj A.G., Krenke A.N., Semenov S.M., Sirotenko O.D., Frolov I.E., Hlebnikova E.I., Sherstyukov B.G., Ananicheva M.D., Anohin Yu.A., Asarin A.E., Asmus V.V., Bolgov M.V., Borisova O.K., Velichko A.A., Grigor'ev A.V., Gudkovich Z.M., Demchenko P.F., Karklin V.P., Karklin V.P., Kislov A.V., Klyachkin S.V., Korzuhin M.D., Krovotyncev V.A.3, Krupchatnikov V.N., Kudeyarov V.N., Lavrov S.A., Lebedev S.A., Malkova G.V., Minin A.A., Myach L.T., Nikonova R.E., Nosenko G.A., Ol'chev A.V., Pavlov A.V., Pavlova V.N., Pavlova T.V., Polunin A.Ya., Popova V.V., Popova E.N., Popovnin V.V., Romanovskij V.A., Sirin A.A., Smolyanickij V.M., Speranskaya N.A., Streleckij D.A., Terziev F.S., Filippov Yu.G., Frolov S.V., Haruk V.I., Holodov A.L., Hromova T.E., Shalygin A.L., Shiklomanov N.I., Shmakin A.B. 2012. *Metody ocenki posledstvij izmeneniya klimata dlya fizicheskih i biologicheskih sistem* [Climate change impact assessment methods for physical and biological systems]. Moscow, 512 p.

Bartalev S.A., Stycenko F.V., Egorov V.A., Lupyan E.A. 2015. Sputnikovaya ocenka gibeli lesov Rossii ot pozharov [Satellite assessment of the death of Russian forests from fires]. *Lesovedenie – Forest Science*, no. 2, pp. 83-94.

Bondur V.G., Ginzburg A.S. 2016. Emission of carbon-bearing gases and aerosols from natural fires on the territory of Russia based on space monitoring. *Doklady Earth Sciences*, vol. 466, no. 4, pp. 473-477. Doi:10.1134/S1028334X16020045.

Bondur V.G., Gordo K.A., Kladov V.L. 2016. Prostranstvenno-vremennye raspredeleniya ploshchadej prirodnyh pozharov i emissij uglerodsoderzhashchih gazov i aerozolej na territorii Severnoj Evrazii po dannym kosmicheskogo monitoringa [Spatio-temporal distributions of areas of natural fires and emissions of carbon-containing gases and aerosols in Northern Eurasia according to space monitoring]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa – Earth Exploration from Space*, no. 6, pp. 3-20. Doi:10.7868/S0205961416060105.

Vasileva A.V. 2012. Vliyanie prirodnyh pozharov na krupnomasshtabnuyu izmenchivost' polya prizemnogo CO v Severnoj Evrazii [The effect of natural fires on the large-scale variability of the surface CO field in Northern Eurasia]. Extended abstract of Doctor's thesis. Moscow, 155 p.

Vivchar A.V., Moiseenko K.B., Pankratova N.V. 2010. Estimates of carbon monoxide emissions from wildfires in northern Eurasia for air quality assessment and climate modeling. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, vol. 46, no. 3, pp. 281-293. Doi:10.1134/S0001433810030023

Vinogradova A.A., Vasileva A.V. 2017. Black carbon in air over northern regions of Russia: Sources and spatiotemporal variations. *Atmospheric and Oceanic Optics*, vol. 30, no. 6, pp. 533-541. Doi:10.1134/S1024856017060161.

Vinogradova A.A., Smirnov N.S., Korotkov V.N., Romanovskaya A.A. 2015. Forest fires in Siberia and the Far East: Emissions and atmospheric transport of black carbon to the Arctic. *Atmospheric and Oceanic Optics*, vol. 28, no. 6, pp. 566-574. Doi:10.1134/S1024856015060184.

Grishin A.M. 1981. *Matematicheskie modeli lesnyh pozharov* [Mathematical models of forest fires]. Tomsk, 277 p.

Grishin A.M. 1992. *Matematicheskie modeli lesnyh pozharov i novye sposoby bor'by s nimi* [Mathematical models of forest fires and new ways to deal with them]. Novosibirsk, 408 p.

Grishin A.M. 1994. Fizika lesnyh pozharov [Physics of Forest Fire]. Tomsk, 218 p.

Grishin A.M., Dolgov A.A., Zima V.P., Rejno V.V., Cvyk R.Sh. 1997. Teplovizionnye issledovaniya razvitiya i rasprostraneniya nizovogo lesnogo pozhara [Thermal imaging studies of the development and spread of grassroots forest fire]. *Optika atmosfery i okeana – Atmopsheric and Oceanic Optics*, vol. 10, no. 10, pp. 1139-1150.

Eliseev A.V. 2011. Estimation of changes in characteristics of the climate and carbon cycle in the 21st century accounting for the uncertainty of terrestrial biota parameter values. *Izvestiya*, *Atmospheric and Oceanic Physics*, vol. 47, no. 2, pp. 131-153. Doi:10.1134/S0001433811030042.

Eliseev A.V. 2017. Global'nyj cikl CO₂: osnovnye processy i vzaimodejstvie s klimatom [The global CO₂ cycle: key processes and climate change]. Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya – Fundamental and Applied Climatology, vol. 4, pp. 9-31.

Eliseev A.V. 2018. Global'nyj cikl metana: obzor [Global methane cycle: A review]. Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya – Fundamental and Applied Climatology, vol. 1, pp. 52-70.

Eliseev A.V., Mokhov I.I., Chernokulsky A.V. 2014. Influence of ground and peat fires on CO₂ emissions into the atmosphere. *Doklady Earth Sciences*, vol. 459, no. 2, pp. 1565-1569. Doi:10.1134/S1028334X14120034.

Eliseev A.V., Mokhov I.I., Chernokulsky A.V. 2017. The influence of lightning activity and anthropogenic factors on large-scale characteristics of natural fires. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, vol. 53, no. 1, pp. 1-11. Doi:10.1134/S0001433817010054.

Melekhov I.S. 1947. *Priroda lesa i lesnye pozhary* [Forest nature and forest fires]. Arhangelsk, 44 p.

Melekhov I.S. 1978. Lesnaya pirologiya [Forest pyrology]. Moscow, 71 p.

Mokhov I.I., Eliseev A.V. 2012. Modeling of global climate variations in the 20th-23rd centuries with new RCP scenarios of anthropogenic forcing. *Doklady Earth Sciences*, vol. 443, no. 6, pp. 532-536. Doi: 10.1134/S1028334X12040228.

Mokhov I.I., Eliseev A.V., Guryanov V.V. 2020. Model estimates of global and regional climate changes in the Holocene. *Doklady Earth Sciences*, vol. 490, no. 1, pp. 223-227. Doi 10.1134/S1028334X20010067.

Mokhov I.I., Chernokulsky A.V. 2010. Regional'nye model'nye ocenki riska lesnyh pozharov v aziatskoj chasti Rossii pri izmeneniyah klimata [Regional model risk assessments of forest fires in the Asian part of Russia with climate change]. *Geografiya i prirodnye resursy – Geography and natural resources*, no. 2, pp. 120-126.

NIR. 2017. National Inventory Report of anthropogenic emissions by sources and removals by sink of greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol. Part 1. Moscow, 471 p.

Nesterov V.G. 1949. *Gorimost' lesa i metody ee opredeleniya* [Forest burning and methods for its determination]. Moscow, Leningrad, 76 p.

Obyazov V.A. 2012. Effects of changes in meteorological conditions on the forest fire conditions in Zabaikal'skii krai. *Russian Meteorology and Hydrology*, vol. 37, no. 6, pp. 27-35. Doi:10.3103/S1068373912060039.

Ponomarev E.I., Shvecov E.G. 2013. Harakteristiki kategorij pozharov rastitel'nosti v Sibiri po dannym sputnikovyh i drugih nablyudenij [Characteristics of categories of vegetation fires in Siberia according to satellite and other observations]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa – Earth Exploration from Space*, no. 5, pp. 45-54. Doi:10.7868/S0205961413050035.

Rakitin V.S., Elansky N.F., Pankratova N.V., Skorohod A.I., Dzhola A.V., Shtabkin Yu.A., Wang P., Wang G., Vasilieva A.V., Makarova M.V., Grechko E.I. 2017. Study of trends of total CO and CH4 contents over Eurasia through analysis of ground-based and satellite spectroscopic measurements. *Atmospheric and Oceanic Optics*, vol. 30, no. 6, pp. 517-526. Doi:10.1134/S1024856017060112.

Romanovskaya A.A., Imshennik E.V., Karaban R.T., Smirnov N.S., Korotkov V.N., Trunov A.A. 2016. Anthropogenic emissions of short-lived climate-active substances on the territory of Russia within the period from 2000 to 2013. *Problems Of Ecological Monitoring And Ecosystem Modelling*, vol. 27, pp. 27-48. Doi:10.21513/0207-2564-2016-1-27-48.

Smirnov N.S., Korotkov V.N., Romanovskaya A. A. 2015. Black carbon emissions from wildfires on forest lands of the Russian Federation in 2007-2012. *Russian Meteorology and Hydrology*, vol. 40, no. 7, pp. 435-442. Doi:10.3103/S1068373915070018.

Sofronov M.A. 1967. *Lesnye pozhary v gorah Yuzhnoj Sibiri* [Forest fires in the mountains of Southern Siberia]. Moscow, 152 p.

Surkova G.V. 2002. *Himiya atmosfery* [Atmospheric chemistry]. Moscow, 210 p.

Shvidenko A.Z., Shchepashchenko D.G. 2013. Klimaticheskie izmeneniya i lesnye pozhary v Rossii [Climate change and forest fires in Russia]. *Lesovedenie – Forest Science*, no. 5, pp. 50-61.

Akagi S.K., Yokelson R.J., Wiedinmyer C., Alvarado M.J., Reid J.S., Karl T., Crounse J.D., Wennberg P.O. 2011. Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models. – Atmospheric Chemistry and Physics, vol. 11, No. 9, pp. 4039-4072. Doi:10.5194/acp-11-4039-2011.

Alonso-Canas I., Chuvieco E. 2015. Global burned area mapping from ENVISATMERIS and MODIS active fire data. – Remote Sensing of Environment, vol. 163, pp. 140-152. Doi:10.1016/j.rse.2015.03.011.

Andela N., Morton D.C., Giglio L., Paugam R., Chen Y., Hantson S., van der Werf G.R., Randerson J.T. 2019. The Global Fire Atlas of individual fire

size, duration, speed and direction. – Earth System Science Data, vol. 11, No. 2, pp. 529-552. Doi:10.5194/essd-11-529-2019.

Andreae M.O. 2019. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning - an updated assessment. – Atmospheric Chemistry and Physics, vol. 19, No. 13, pp. 8523-8546. Doi:10.5194/acp-19-8523-2019.

Andreae M.O., Merlet P. 2001. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. – Global Biogeochemical Cycles, vol. 15, No. 4, pp. 955-966. Doi:10.1029/2000GB001382.

Arora V.K., Boer G.J. 2005. Fire as an interactive component of dynamic vegetation models. – Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, vol. 110, No. G2, G02008. Doi:10.1029/2005JG000042.

Arora V.K., Boer G.J., Friedlingstein P., Eby M., Jones C.D., Christian J.R., Bonan G., Bopp L., Brovkin V., Cadule P., Hajima T., Ilyina T., Lindsay K., Tjiputra J.F., Wu T. 2013. Carbon-concentration and carbon-climate feedbacks in CMIP5 Earth System Models. – Journal of Climate, vol. 26, No. 15, pp. 5289-5314. Doi:10.1175/JCLI-D-12-00494.1.

Chen Q., Farmer D.K., Schneider J., Zorn S.R., Heald C.L., Karl T.G., Guenther A., Allan J.D., Robinson N., Coe H., Kimmel J.R., Pauliquevis T., Borrmann S., Pöschl U., Andreae M.O., Artaxo P., Jimenez J.L., Martin S.T. 2009. Mass spectral characterization of submicron biogenic organic particles in the Amazon Basin. – Geophysical Research Letters, vol. 36, No. 20, L20806. Doi:10.1029/2009GL039880.

Climate Change 2013: The Physical Science Basis. 2013. – Cambridge/New York: Cambridge University Press, 1535 p.

Conard S.G., Ivanova G.A. 1997. Wildfire in Russian boreal forests - potential impacts of fire regime characteristics on emissions and global carbon balance estimates. – Environmental Pollution, vol. 98, No. 3, pp. 305-313. Doi:10.1016/S0269-7491(97)00140-1.

Daniau A.-L., Harrison S.P., Bartlein P.J. 2010. Fire regimes during the Last Glacial. — Quaternary Science Reviews, vol. 29, No. 21, pp. 2918-2930. Doi:10.1016/j.quascirev.2009.11.008.

Eliseev A.V., Mokhov I.I. 2011. Uncertainty of climate response to natural and anthropogenic forcings due to different land use scenarios. – Advances in Atmospheric Sciences, vol. 28, No. 5, pp. 1215-1232. Doi:10.1007/s00376-010-0054-8.

Eliseev A.V., Mokhov I.I., Chernokulsky A.V. 2014. An ensemble approach to simulate CO₂ emissions from natural fires. – Biogeosciences, vol. 11, No. 12, pp. 3205-3223. Doi:10.5194/bg-11-3205-2014.

Ferek R.J., Reid J.S., Hobbs P.V., Blake D.R., Liousse C. 1998. Emission factors of hydrocarbons, halocarbons, trace gases, and particles from biomass burning in Brazil. – Journal of Geophysical Research, vol. 103, No. D24, pp. 32107-32118. Doi:10.1029/98JD00692.

Ganteaume A., Camia A., Jappiot M., San-Miguel-Ayanz J., Long-Fournel M., Lampin C. 2013. A review of the main driving factors of forest fire ignition over Europe. – Environmental Management, vol. 51, No. 3, pp. 651-662. Doi:10.1007/s00267-012-9961-z.

Gidden M.J., Riahi K., Smith S.J., Fujimori S., Luderer G., Kriegler E., van Vuuren D.P., van den Berg M., Feng L., Klein D., Calvin K., Doelman J.C., Frank S., Fricko O., Harmsen M., Hasegawa T., Havlik P., Hilaire J., Hoesly R., Horing J., Popp A., Stehfest E., Takahashi K. 2019. Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: a dataset of armonized emissions trajectories through the end of the century. — Geoscientific Model Development, vol. 12, No. 4, pp. 1443-1475. Doi:10.5194/gmd-12-1443-2019.

Giglio L., Randerson J.T., van der Werf G.R., Kasibhatla P.S., Collatz G.J., Morton D.C., DeFries R.S. 2010. Assessing variability and long-term trends in burned area by merging multiple satellite fire products. – Biogeosciences, vol. 7, No. 3, pp. 1171-1186. Doi:10.5194/bg-7-1171-2010.

Giglio L., Randerson J.T., van der Werf G.R. 2013. Analysis of daily, monthly, and annual burned area using the fourth-generation global fire emissions database (GFED4). – Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, vol. 118, No. 1, pp. 317-328. Doi:10.1002/jgrg.20042.

Goldammer J.G., Furyaev V.V. 1996. Fire in ecosystems of boreal Eurasia. – Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 531 p.

Grishin A.M., Filkov A.I., Loboda E.L., Kuznetsov V.T., Kasymov D.P., Andreyuk S.M., Ivanov A.I., Stolyarchuk N.D., Reyno V.V., Kozlov A.V. 2014. A field experiment on grass fire effects on wooden constructions and peat layer ignition. – International Journal of Wildland Fire, vol. 23, No. 3, pp. 445-449.

Guo M., Li J., Xu J., Wang X., He H., Wu L. 2017. CO₂ emissions from the 2010 Russian wildfires using GOSAT data. – Environmental Pollution, vol. 226, pp. 60-68. Doi:10.1016/j.envpol.2017.04.014.

Hantson S., Arneth A., Harrison S.P., Kelley D.I., Prentice I.C., Rabin S.S., Archibald S., Mouillot F., Arnold S.R., Artaxo P., Bachelet D., Ciais P., Forrest M., Friedlingstein P., Hickler T., Kaplan J.O., Kloster S., Knorr W., Lasslop G., Li F., Mangeon S., Melton J.R., Meyn A., Sitch S., Spessa A., van der Werf G.R., Voulgarakis A., Yue C. 2016. The status and challenge of global fire modellingto – Biogeosciences, vol. 13, No. 11, pp. 3359-3375. Doi:10.5194/bg-13-3359-2016.

Hantson S., Kelley D.I., Arneth A., Harrison S.P., Archibald S., Bachelet D., Forrest M., Hickler T., Lasslop G., Li F., Mangeon S., Melton J.R., Nieradzik L., Rabin S.S., Prentice I.C., Sheehan T., Sitch S., Teckentrup L., Voulgarakis A., Yue C. 2020. Quantitative assessment of fire and vegetation properties in simulations with fire-enabled vegetation models from the Fire Model Intercomparison Project – Geoscientific Model Development, vol. 13, No. 7, p. 3299-3318. Doi:10.5194/gmd-13-3299-2020.

Harrison S.P., Bartlein P.J., Brovkin V., Houweling S., Kloster S., Prentice I.C. 2018. The biomass burning contribution to climate-carbon-cycle feedback. – Earth

System Dynamics, vol. 9, No. 2, pp. 663-677. Doi:10.5194/esd-9-663-2018.

Holgate C.M., van Dijk A.I.J.M., Cary G.J., Yebra M. 2017. Using alternative soil moisture estimates in the McArthur Forest Fire Danger Index. – International Journal of Wildland Fire, vol. 26, No. 9, pp. 806-819. Doi:10.1071/WF16217.

Humber M.L., Boschetti L., Giglio L., Justice C.O. 2019. Spatial and temporal intercomparison of four global burned area products. – International Journal of Digital Earth, vol. 12, No. 4, pp. 460-484. Doi:10.1080/17538947.2018.1433727.

Jones M.W., Santín C., van der Werf G.R., Doerr S.H. 2019. Global fire emissions buffered by the production of pyrogenic carbon. – Nature Geosciences, vol. 12, No. 742-747. Doi:10.1038/s41561-019-0403-x.

Kasischke E.S., Hyer E.J., Novelli P.C., Bruhwiler L.P., French N.H.F., Sukhinin A.I., Hewson J.H., Stocks B.J. 2005. Influences of boreal fire emissions on Northern Hemisphere atmospheric carbon and carbon monoxide. — Global Biogeochemical Cycles, vol. 19, No. 1, GB1012. Doi:10.1029/2004GB002300.

Kaufman Y.J., Justice C.O., Flynn L.P., Kendall J. D., Prins E.M., Giglio L., Ward D.E., Menzel W. P., Setzer A.W. 1998. Potential global fire monitoring from EOS-MODIS. – Journal of Geophysical Research: Atmospheres, vol. 103, No. D24, pp. 32215-32238. Doi:10.1029/98JD01644.

Kloster S., Lasslop G. 2017. Historical and future fire occurrence (1850 to 2100) simulated in CMIP5 Earth System Models. – Global and Planetary Change, vol. 150, pp. 58-69. Doi:10.1016/j.gloplacha.2016.12.017.

Kloster S., Mahowald N.M., Randerson J.T., Lawrence P.J. 2012. The impacts of climate, land use, and demography on fires during the 21st century simulated by CLM-CN. – Biogeosciences, vol. 9, No. 1, pp. 509-525. Doi:10.5194/bg-9-509-2012.

Kloster S., Mahowald N.M., Randerson J.T., Thornton P.E., Hoffman F.M., Levis S., Lawrence P.J., Feddema J.J., Oleson K.W., Lawrence D.M. 2010. Fire dynamics during the 20th century simulated by the Community Land Model. – Biogeosciences, vol. 7, No. 6, pp. 1877-1902. Doi:10.5194/bg-7-1877-2010.

Konovalov I.B., Beekmann M., Kuznetsova I.N., Yurova A., Zvyagintsev A.M. 2011. Atmospheric impacts of the 2010 Russian wildfires: integrating modelling and measurements of an extreme air pollution episode in the Moscow region. – Atmospheric Chemistry and Physics, vol. 11, No. 11, pp. 10031-10056. Doi:10.5194/acp-11-10031-2011.

Lasslop G., Brovkin V., Reick C.H., Bathiany S., Kloster S. 2016. Multiple stable states of tree cover in a global land surface model due to a fire-vegetation feedback. – Geophysical Research Letters, vol. 43, No. 12, pp. 6324-6331. Doi:10.1002/2016GL069365.

Lasslop G., Coppola A.I., Voulgarakis A., Yue C., Veraverbeke S., 2019. Influence of fire on the carbon cycle and climate. – Current Climate Change Reports, vol. 5, No. 2, pp. 112-123. Doi:10.1007/s40641-019-00128-9.

Lasslop G., Thonicke K., Kloster S. 2014. SPITFIRE within the MPI Earth system model: Model development and evaluation. – Journal of Advances in Mo-

deling Earth Systems, vol. 6, No. 3, pp. 740-755. Doi:10.1002/2013MS000284.

Lawrence D.M., Fisher R.A., Koven C.D., Oleson K.W., Swenson S.C., Bonan G., Collier N., Ghimire B., van Kampenhout L., Kennedy D., Kluzek E., Lawrence P.J., Li F., Li H., Lombardozzi D., Riley W.J., Sacks W.J., Shi M., Wieder W.R., Xu C., Ali A.A., Vertenstein M., Badger A.M., van den Broeke M., Brunke M.A., Burns S.P., Buzan J., Clark M., Craig A., Dahlin K., Drewniak B., Fisher J.B., Flanner M., Fox A.M., Gentine P., Hoffman F., Keppel-Aleks G., Knox R., Kumar S., Lenaerts J., Leung L.R., Lipscomb W.H., Lu Y., Pandey A., Pelletier J.D., Perket J., Randerson J.T., Sanderson B.M., Slater A., Subin Z.M., Tang J., Thomas R.Q., Val Martin M., Zeng X. 2019. The Community Land Model version 5: Description of new features, benchmarking, and impact of forcing uncertainty. - Journal of Advances in Modeling Earth Systems, vol. 11, No. 12, pp. 4245-4287. Doi:10.1029/2018MS001583.

- Li F., Lawrence D.M. 2017. Role of fire in the global land water budget during the twentieth century due to changing ecosystems. Journal of Climate, vol. 30, No. 6, pp. 1893-1908. Doi:10.1175/JCLI-D-16-0460.1.
- Li F., Lawrence D.M., Bond-Lamberty B. 2017. Impact of fire on global land surface air temperature and energy budget for the 20th century due to changes within ecosystems. Environmental Research Letters, vol. 12, No. 4, p. 044014. Doi:10.1088/1748-9326/aa6685.
- Li F., Zeng X.D., Levis S. 2012. A process-based fire parameterization of intermediate complexity in a Dynamic Global Vegetation Model. Biogeosciences, vol. 9, No. 7, pp. 2761-2780. Doi:10.5194/bg-9-2761-2012.
- Liu Z., Ballantyne A.P., Cooper L.A. 2018. Increases in land surface temperature in response to fire in Siberian boreal forests and their attribution to biophysical processes. Geophysical Research Letters, vol. 45, No. 13, pp. 6485-6494. Doi:10.1029/2018GL078283.
- Mangeon S., Voulgarakis A., Gilham R., Harper A., Sitch S., Folberth G. 2016. INFERNO: a fire and emissions scheme for the UK Met Office's Unified Model. Geoscientific Model Development, vol. 9, No. 8, pp. 2685-2700. Doi:10.5194/gmd-9-2685-2016.
- Marlon J.R., Bartlein P.J., Carcaillet C., Gavin D.G., Harrison S.P., Higuera P.E., Joos F., Power M.J., Prentice I.C. 2008. Climate and human influences on global biomass burning over the past two millennia. Nature Geosciences, vol. 1, No. 10, pp. 697-702. Doi:10.1038/ngeo313.
- Marlon J.R., Kelly R., Daniau A.-L., Vannière B., Power M.J., Bartlein P., Higuera P., Blarquez O., Brewer S., Brücher T., Feurdean A., Romera G.G., Iglesias V., Maezumi S.Y., Magi B., Courtney Mustaphi C.J., Zhihai T. 2016. Reconstructions of biomass burning from sediment-charcoal records to improve data-model comparisons. Biogeosciences, vol. 13, No. 11, pp. 3225-3244. Doi:10.5194/bg-13-3225-2016.

McArthur A.G. 1967. Fire behaviour in eucalypt forests. – Canberra, Commonwealth of Australia, 36 p.

Mezuman K., Tsigaridis K., Faluvegi G., Bauer S.E. 2020. The interactive global fire module pyrE (v1.0) – Geoscientific Model Development, vol. 13, No. 7, pp. 3091-3118. Doi:10.5194/gmd-13-3091-2020.

Pechony O., Shindell D.T. 2009. Fire parameterization on a global scale. – Journal of Geophysical Research: Atmospheres, vol. 114, No. D16, D16115. Doi:10.1029/2009JD011927.

Pellegrini A.F.A., Ahlström A., Hobbie S.E., Reich P.B., Nieradzik L.P., Staver A.C., Scharenbroch B.C., Jumpponen A., Anderegg W.R.L., Randerson J.T., Jackson R.B. 2018. Fire frequency drives decadal changes in soil carbon and nitrogen and ecosystem productivity. – Nature, vol. 553, No. 7687, pp. 194-198. Doi:10.1038/nature24668.

Pfeiffer M., Spessa A., Kaplan J.O. 2013. A model for global biomass burning in preindustrial time: LPJ-LMfire (v1.0). – Geoscientific Model Development, vol. 6, No. 3, pp. 643-685. Doi:10.5194/gmd-6-643-2013

Power M.J., Marlon J., Ortiz N., Bartlein P.J., Harrison S.P., Mayle F.E., Ballouche A., Bradshaw R.H.W., Carcaillet C., Cordova C., Mooney S., Moreno P.I., Prentice I.C., Thonicke K., Tinner W., Whitlock C., Zhang Y., Zhao Y., Ali A.A., Anderson R.S., Beer R., Behling H., Briles C., Brown K.J., Brunelle A., Bush M., Camill P., Chu G.Q., Clark J., Colombaroli D., Connor S., Daniau A.-L., Daniels M., Dodson J., Doughty E., Edwards M.E., Finsinger W., Foster D., Frechette J., Gaillard M.-J., Gavin D.G., Gobet E., Haberle S., Hallett D.J., Higuera P., Hope G., Horn S., Inoue J., Kaltenrieder P., Kennedy L., Kong Z.C., Larsen C., Long C.J., Lynch J., Lynch E.A., McGlone M., Meeks S., Mensing S., Meyer G., Minckley T., Mohr J., Nelson D.M., New J., Newnham R., Noti R., Oswald W., Pierce J., Richard P.J.H., Rowe C., Sanchez Goñi M.F., Shuman B.N., Takahara H., Toney J., Turney C., Urrego-Sanchez D.H., Umbanhowar C., Vandergoes M., Vanniere B., Vescovi E., Walsh M., Wang X., Williams N., Wilmshurst J., Zhang J.H. 2015. Changes in fire regimes since the Last Glacial Maximum: an assessment based on a global synthesis and analysis of charcoal data. - Climate Dynamics, vol. 30, No. 7-8, pp. 887-907. Doi:10.1007/s00382-007-0334-x.

Randerson J.T., Chen Y., van der Werf G.R., Rogers B.M., Morton D.C. 2012. Global burned area and biomass burning emissions from small fires. – Journal Geophysical Research: Biogeosciences, vol. 117, No. G4, G04012. Doi:10.1029/2012JG002128.

Romanovskaya A.A., Korotkov V.N., Polumieva P.D., Trunov A.A., Vertyankina V.Yu., Karaban R.T. 2020. Greenhouse gas fluxes and mitigation potential for managed lands in the Russian Federation – Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, vol. 25, No. 4, pp. 661-687. Doi:10.1007/s11027-019-09885-2.

Rothermel R.C. 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. – Ogden: U.S. Department of Agriculture, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 40 p.

Roy D.P., Jin Y., Lewis P.E., Justice C.O. 2005. Prototyping a global algorithm

for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data. – Remote Sensing of Environment, vol. 7, No. 2, p. 137-162. Doi:10.1016/j.rse.2005.04.007.

Seiler W., Crutzen P.J. 1980. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning. – Climatic Change, vol. 2, No. 3, pp. 207-247. Doi:10.1007/BF00137988.

Soja A.J., Cofer W.R., Shugart H.H., Sukhinin A.I., Stackhouse P.W., McRae D.J., Conard S.G. 2004. Estimating fire emissions and disparities in boreal Siberia (1998-2002). – Journal of Geophysical Research, vol. 109, No. D14, D14S06. Doi:10.1029/2004JD004570.

Stocks B.J., Mason J.A., Todd J.B., Bosch E.M., Wotton B.M., Amiro B.D., Flannigan M.D., Hirsch K.G., Logan K.A., Martell D.L., Skinner W.R. 2002. Large forest fires in Canada, 1959-1997. – Journal Geophysical Research: Atmospheres, vol. 107, No. D1, 8149. Doi:10.1029/2001JD000484.

Sullivan A.L. 2009a. Wildland surface fire spread modelling, 1990-2007. 1: Physical and quasi-physical models. – International Journal Wildland Fire, vol. 18, No. 4, pp. 349-368. Doi:10.1071/WF06143

Sullivan A.L. 2009b. Wildland surface fire spread modelling, 1990-2007. 2: Empirical and quasi-empirical models. – International Journal Wildland Fire, vol. 18, No. 4, pp. 369-386. Doi:10.1071/WF06142

Sullivan A.L. 2009c. Wildland surface fire spread modelling, 1990-2007. 3: Simulation and mathematical analogue models. – International Journal Wildland Fire, vol. 18, No. 4, pp. 387-403. Doi:10.1071/WF0614.

Tansey K., Grégoire J., Defourny P., Leigh R., Pekel J., van Bogaert E., Bartholomé E. 2008. A new, global, multi-annual (2000-2007) burnt area product at 1 km resolution. — Geophysical Research Letters, vol. 35, No. 1, L01401. Doi:10.1029/2007GL031567.

Teckentrup L., Harrison S.P., Hantson S., Heil A., Melton J.R., Forrest M., Li F., Yue C., Arneth A., Hickler T., Sitch S., Lasslop G. 2019. Response of simulated burned area to historical changes in environmental and anthropogenic factors: a comparison of seven fire models. – Biogeosciences, vol. 16, No. 19, pp. 3883-3910. Doi:10.5194/bg-16-3883-2019.

Thonicke K., Spessa A., Prentice I.C., Harrison S.P., Dong L., Carmona-Moreno C. 2010. The influence of vegetation, fire spread and fire behaviour on biomass burning and trace gas emissions: results from a process-based model. – Biogeosciences, vol. 6, pp. 1991-2011. Doi:10.5194/bg-7-1991-2010.

Thonicke K., Venevsky S., Sitch S., Cramer W. 2001. The role of fire disturbance for global vegetation dynamics: coupling fire into a Dynamic Global Vegetaion Model. – Global Ecology and Biogeography, vol. 10, No. 6, pp. 661-677. Doi:10.1046/j.1466-822X.2001.00175.x.

van der Werf G.R., Randerson J.T., Collatz G.J., Giglio L., Kasibhatla P.S., Arellano A.F., Olsen S.C., Kasischke E.S. 2004. Continental-scale partitioning of

fire emissions during the 1997 to 2001 El Niño/La Niña period. – Science, vol. 303, No. 5654, pp. 73-76. Doi:10.1126/science.1090753.

van der Werf G.R., Randerson J.T., Giglio L., Collatz G.J., Mu M., Kasibhatla P.S., Morton D.C., DeFries R.S., Jin Y., van Leeuwen T.T. 2010. Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997-2009). – Atmospheric Chemistry and Physics, vol. 10, No. 23, pp. 11707-11735. Doi:10.5194/acp-10-11707-2010.

van der Werf G.R., Randerson J.T., Giglio L., van Leeuwen T.T., Chen Y., Rogers B.M., Mu M., van Marle M.J.E., Morton D.C., Collatz G.J., Yokelson R.J., Kasibhatla P.S. 2017. Global fire emissions estimates during 1997-2016. – Earth System Science Dynamics, vol. 9, No. 2, pp. 697-720. Doi:10.5194/essd-9-697-2017.

Vasileva A.V., Moiseenko K.B., Mayer J.-C., Jurgens N., Panov A., Heimann M., Andreae M.O. 2011. Assessment of the regional atmospheric impact of wildfire emissions based on CO observations at the ZOTTO tall tower station in central Siberia. – Journal of the Geophysical Research: Atmopsheres. vol. 116, No. D7, D07301. Doi:10.1029/2010JD014571.

Vasileva A., Moiseenko K. 2013. Methane emissions from 2000 to 2011 wildfires in Northeast Eurasia estimated with MODIS burned area data. – Atmospheric Environment, vol. 71, pp. 115-121. Doi:10.1016/j.atmosenv.2013. 02.001.

Venevsky S., Thonicke K., Sitch S., Cramer W. 2002. Simulating fire regimes in human-dominated ecosystems: Iberian Peninsula case study. — Global Change Biology, vol. 8, No. 10, pp. 984-998. Doi:10.1046/j.1365-2486.2002.00528.x.

Vivchar A. 2011. Wildfires in Russia in 2000-2008: estimates of burnt areas using the satellite MODIS MCD45 data. – Remote Sensing Letters, vol. 2, No. 1, pp. 81-90. Doi:10.1080/01431161.2010.499138.

Whelan R.J. 1995. The ecology of fire. – Cambridge, Cambridge University Press, Cambridge, 346 p.

Yokelson R.J., Christian T. J., Karl T. G., Guenther A. 2008. The tropical forest and fire emissions experiment: laboratory fire measurements and synthesis of campaign data. – Atmospheric Chemistry and Physics, vol. 8, No. 13, pp. 3509-3527. Doi:10.5194/acp-8-3509-2008.

Yue C., Ciais P., Cadule P., Thonicke K., Archibald S., Poulter B., Hao W.M., Hantson S., Mouillot F., Friedlingstein P., Maignan F., Viovy N. 2014. Modelling the role of fires in the terrestrial carbon balance by incorporating SPITFIRE into the global vegetation model ORCHIDEE - Part 1: simulating historical global burned area and fire regimes. — Geoscientific Model Development, vol. 7, No. 6, pp. 2747-2767. Doi:10.5194/gmd-7-2747-2014.