

УДК 551.583

## ВЛИЯНИЕ МОЛНИЕВОЙ АКТИВНОСТИ И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ

© 2017 г. А. В. Елисеев\*, И. И. Мохов, А. В. Чернокульский

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН  
119017 Москва, Пыжевский пер., 3*

*\*E-mail: eliseev@ifaran.ru*

Поступила в редакцию 16.06.2015 г.

После доработки 20.11.2015 г.

Схема природных пожаров (ПП) климатической модели Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (КМ ИФА РАН) расширена учетом влияния молниевой активности и плотности населения на частоту возгораний и подавление пожаров. С КМ ИФА РАН проведены численные эксперименты в соответствии с условиями проекта сравнения климатических моделей CMIP5 (Coupled Models Intercomparison Project, phase 5). Частота молниевых вспышек задавалась в соответствии со спутниковыми данными LIS/OTD. В проведенных расчетах доминирующую роль в возникновении ПП играют антропогенные возгорания, за исключением регионов субполярных широт и в меньшей степени тропических и субтропических регионов. Учет связи числа пожаров с молниевой активностью и плотностью населения в модели усиливает влияние характеристик природных пожаров на изменения климата в тропиках и субтропиках по сравнению с версией КМ ИФА РАН без учета влияния источников возгорания на крупномасштабные характеристики ПП.

**Ключевые слова:** КМ ИФА РАН, природные пожары, источники возгорания, сценарии RCP

**DOI:** 10.7868/S0002351517010059

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Природные пожары (ПП) играют важную роль в динамике наземных экосистем, оказывая влияние в том числе на эмиссии различных веществ в атмосферу [1–10]. Климатические изменения, произошедшие в XX в. и в первом десятилетии XXI в., а также ожидаемые в будущем при возможном дальнейшем увеличении антропогенной нагрузки на климат [7, 11], способствуют увеличению риска возникновения засух и природных пожаров [7–10, 12–15].

Одним из факторов изменения опасности возникновения природных пожаров при климатических изменениях может быть изменение частоты гроз и связанных с ними молниевых ударов, которые служат одним из источников возгорания при природных пожарах [2, 16–21]. Наряду с этим следует иметь в виду, что интенсивность источников возгорания (а также подавления возникших пожаров) определяется также и антропогенными факторами, обычно связываемыми с плотностью населения [2, 17].

Целью данной работы является оценка вклада естественных и антропогенных источников возгорания на характеристики природных пожаров в

XVIII–XXIII вв. с использованием глобальной климатической модели (КМ), разработанной в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (ИФА РАН) [9–11, 22–25] при реалистичных сценариях внешнего воздействия на климат [7, 26].

### 2. МОДЕЛЬ И ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Одним из компонентов КМ ИФА РАН является блок углеродного цикла [24, 25] (см. также [27–29]) со статистической схемой расчета среднегодовых характеристик природных пожаров, основанной на модели GlobFIRM [1]). В [9, 10] эта модель была расширена учетом низовых и торфяных пожаров (в исходной модели GlobFIRM учитывались только верховые пожары). Следует отметить, что в GlobFIRM используется предположение о том, что источник возгорания для природного пожара всегда присутствует, так что пожар всегда развивается в случае благоприятной климатической ситуации и при наличии достаточного запаса топлива для горения.

По сравнению с [10], в данной работе схема природных пожаров КМ ИФА РАН расширена

учетом влияния молниевой активности и плотности населения на частоту возгораний и подавление пожаров. Связь числа возгораний с частотой ударов молний на единицу площади  $r_l$  аналогична зависимости, используемой в модели SPITFIRE [2]

$$f_{i,l} = r_l k_{cg} k_{l,eff}. \quad (1)$$

Здесь доля молний между облаком и поверхностью земли относительно полного числа молний  $k_{cg} = 0.3$ , а эффективность возникновения пожара из-за молний (связанная с энергией молниевых ударов и вероятностью попадания молнии в область уже существующего пожара)  $k_{l,eff} = 0.1$ . Произведение коэффициентов  $k_{cg}$  и  $k_{l,eff}$  при этом равно 0.03, что согласуется с соответствующим значением в [8].

Для связи числа антропогенных возгораний  $f_{i,a}$  с плотностью населения  $p$  использована зависимость [17], используемая также в SPITFIRE:

$$f_{i,a} = k_p F_p(p), \quad (2)$$

с  $k_p = 4 \times 10^{-9} \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$  и  $F_p(p) = (p/p_0)^{0.4}$ ,  $p_0 = 1 \text{ чел. км}^{-2}$ .

Наряду с влиянием плотности населения на число антропогенных возгораний, в модели учитывается его влияние на подавление возникающих пожаров. Доля возникших и оставшихся неподавленными пожаров [17]:

$$f_{ns} = f_{ns,min} + (1 - f_{ns,min}) \exp(-k_{ns} p). \quad (3)$$

В (3)  $f_{ns,min} = 0.2$  – асимптотическое значение доли пожаров, которые не подавляются даже при бесконечно большой плотности населения, а  $k_{ns} = 0.2$ , что близко к соответствующему значению в [6].

Полное число неподавленных пожаров в модельной ячейке площадью  $A$  в единицу времени:

$$F_i = [f_{i,l} G_l(W) + f_{i,a} G_a(W)] f_{ns} A, \quad (4)$$

где  $G_Y(W)$  ( $Y = l, a$ ) описывает климатические условия возникновения пожаров в виде функции влагосодержания почвы  $W$  [1, 9, 10]:

$$G_Y(W) = k_Y \exp[-2(W/W_Y)^2]. \quad (5)$$

Значения параметра  $W_Y$  для молниевых и антропогенных источников в КМ ИФА РАН различаются: ( $W_l = 0.95$ ,  $W_a = 0.6$ ;  $W_a$  была откалибрована в [9]) из-за различия синоптических ситуаций, приводящих к возникновению пожаров. Коэффициент  $k_Y$  выбран равным  $8 \times 10^{-3}$ . Подобный подход (но с заменой  $G(W)$  на функцию от эмпирического индекса пожарной опасности) используется также в модели SPITFIRE [2].

Полное число неподавленных пожаров в модельной ячейке связывается с площадью  $S$ , выгорающей в модельной ячейке за единицу времени:

$$S = S_0 (F_i / F_{i,0})^\alpha G_c(c_{f,v}). \quad (6)$$

В (6)  $F_{i,0}$  принималось равным  $100 \text{ г.}^{-1}$ . Функция  $G_c(c_{f,v})$  подобна введенной в [8] и связана с влиянием неоднородности ландшафтов на развитие пожаров в зависимости от запаса топлива в растительности на единицу площади  $c_{f,v}$  (линейной комбинации запаса углерода в листве и древесине [9, 24, 25]). Эта функция равна нулю при  $c_{f,v} < c_{f,v,1} = 0.2 \text{ кгС м}^{-2}$ , единице при  $c_{f,v} > c_{f,v,2} = 0.4 \text{ кгС м}^{-2}$  и линейно зависит от  $c_{f,v}$  при  $c_{f,v,1} < c_{f,v} < c_{f,v,2}$ . Значения  $S_{f,0} = 8.8 \times 10^3 \text{ км}^2 \text{ г}^{-1}$  и  $\alpha = 1.7$  выбраны в соответствии с результатами анализа данных для характеристик ПП на Аляске в 2002–2011 гг. [30].

Доля погибающих при природном пожаре растений в зависимости от типа растительности в модели меняется от 0.1 до 1. При расчете эмиссий  $\text{CO}_2$  в атмосферу  $e$  из-за ПП считается, что листва, тонкие ветки и тонкие корни погибших растений выгорают полностью. Соответствующая доля сгорающей структурированной древесины также зависит от типа растительности и задана так, чтобы полнота сгорания биомассы соответствовала данным, приведенным в [31]. Несгоревшая доля этой древесины для погибших растений переносится в медленно окисляющийся резервуар углерода почвы [24, 25].

С КМ ИФА РАН были проведены численные эксперименты для периода 1700–2300 гг. с учетом сценариев антропогенных и естественных воздействий на климат за счет изменений содержания в атмосфере парниковых газов, тропосферных и стратосферных вулканических сульфатных аэрозолей, солнечной постоянной и сельскохозяйственных площадей в соответствии с условиями международного проекта сравнения климатических моделей CMIP5 (Coupled Models Intercomparison Project, phase 5). В частности, для XXI–XXIII веков антропогенные воздействия учитывались согласно сценариям RCP 4.5 и RCP 8.5 (Representative Concentration Pathways) [26]. Распределение естественных (молниевых) источников возгорания было задано по данным LIS/OTD (Lightning Imaging Sensor/Optical Transient Detector) [32], осредненным за 1995–2010 гг. с учетом годового хода. Подобный неучет межгодовой изменчивости молниевой активности используется, например, в [33] для анализа влияния этой активности на содержание оксидов азота в атмосфере. Плотность населения Земли в 1700–2005 гг. задавалась согласно данным HYDE-3.1 (History Database of the Global Environment) [34]. В связи с тем, что данные о плотности населения Земли для сценариев RCP недоступны для использования [26], в данной работе для  $p$  в XXI в. использовались сценарии семейства SRES (Special Report on Emission Scenarios, <http://www.pbl.nl/en/publications/2006/>). Для сценариев RCP 4.5 и RCP 8.5 были использованы соответственно данные сценариев SRES A1B и

SRES A2 как наиболее близкие к этим сценариям RCP. При этом, однако, для плотности населения использовалось  $(P_{RCP}/P_{SRES})^p$ , где  $P_{RCP}$  и  $P_{SRES}$  — полная численность населения Земли в соответствующих сценариях RCP и SRES. Величина  $P_{RCP}$  была оценена по данным рис. 2 из [26]. Плотность населения Земли в XXI–XXIII вв. фиксировалась на уровне 2100 г.

При каждом сценарии RCP были проведены расчеты со следующими вариантами модели: 1) полная модель; 2) модель с учетом только антропогенных возгораний ( $f_{i,a} \equiv 0$ ); 3) модель с учетом только молниевых возгораний ( $f_{i,l} \equiv 0$ ). В дальнейшем принадлежность к данному численному эксперименту указывается соответствующим нижним индексом.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

#### 3.1. Характеристики природных пожаров для современного периода в расчетах с полной моделью (вариант 1 модели)

В среднем для 1998–2011 гг. (период, для которого доступны данные наблюдений GFED-3.1) [35] глобальная площадь выгорания  $S_g$  из-за ПП для варианта 1 КМ ИФА РАН получена равной  $4.0 \pm 0.1$  млн км<sup>2</sup> г<sup>-1</sup> (рис. 1а), а соответствующие эмиссии CO<sub>2</sub> в атмосферу  $E_g = 1.25 \pm 0.03$  ПгС г<sup>-1</sup> (рис. 1б). Оценка  $S_g$  несколько больше интервала неопределенности эмпирических оценок (от 2.9 до 3.8 млн км<sup>2</sup> г<sup>-1</sup> [8]). Оценка эмиссий  $E_g$  находится внутри интервала неопределенности оценки GFED-3.1 ( $1.4 \pm 0.2$  ПгС г<sup>-1</sup>).

Модель в целом реалистично воспроизводит общую пространственную структуру площади выгорания из-за природных пожаров в современный период (см. рис. 2а, 2в для периода повторяемости пожаров  $R$ , определяемого как величина, обратная доле модельной ячейки, выгорающей ежегодно из-за ПП). И по модельным расчетам, и по наблюдениям  $R$  минимален в тропиках и субтропиках с типичными значениями в несколько десятков лет. Тем не менее модель занижает площадь выгорания в средних широтах и завышает их в регионе Балтийского моря. Это связано с завышением влагосодержания почвы в первых регионах и занижением — в последнем. Модель также недооценивает площадь выгорания в Забайкалье. Следует, однако, отметить, что в период, охватываемый данными GFED-3.1, площадь выгорания из-за ПП в этом регионе увеличилась на порядок по сравнению с предыдущими периодами [36]. Как следствие, данные GFED-3.1 могут быть непредставительны для более длинного периода, тогда как недооценка естественной изменчивости климата современной версией КМ ИФА РАН [9] может затруднять воспроизведение периодов с

резкими изменениями характеристик климата, в том числе и определяющих опасность возникновения природных пожаров.

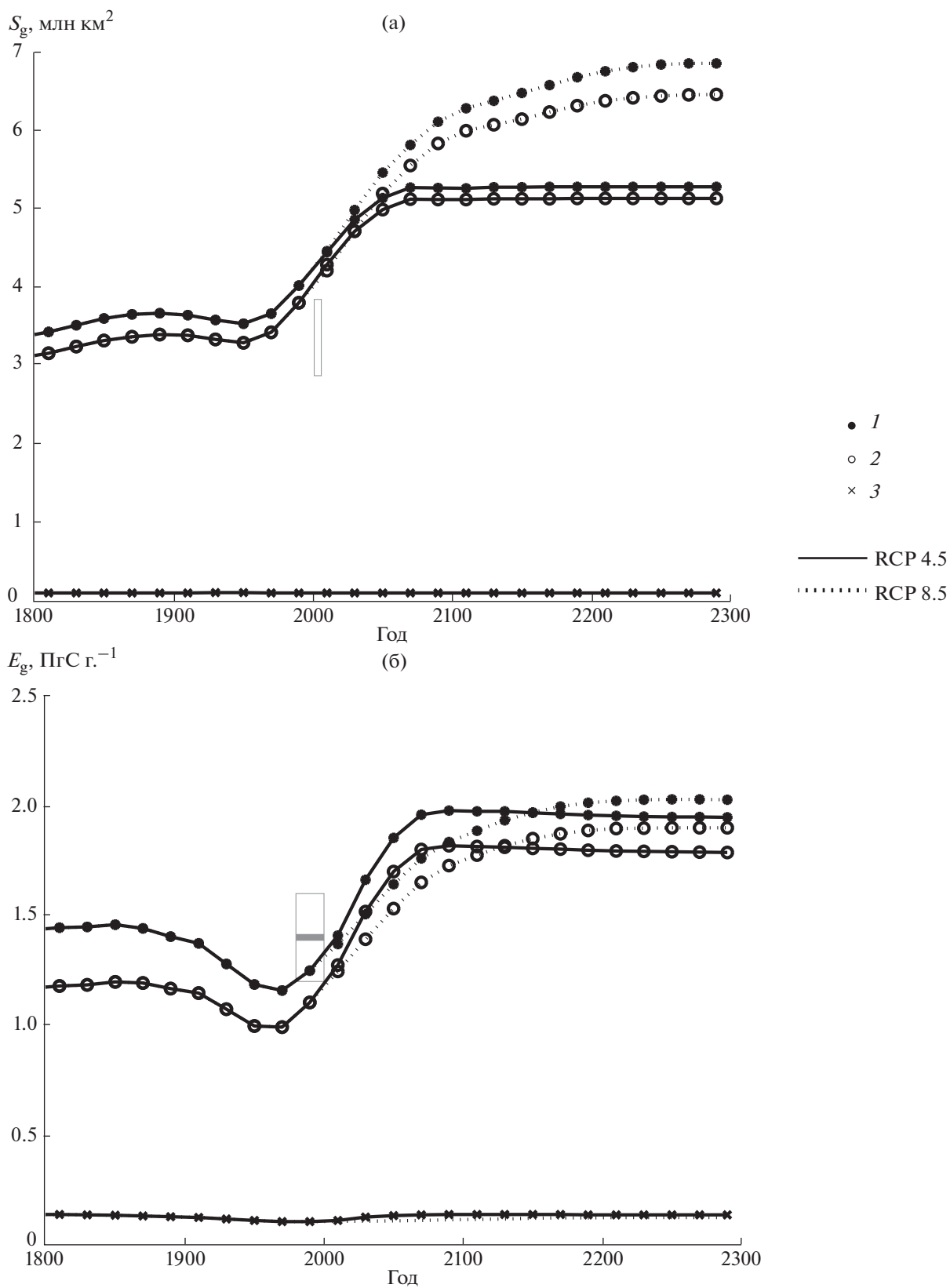
Модель также в целом реалистично воспроизводит соответствующую структуру эмиссий CO<sub>2</sub> в атмосферу из-за природных пожаров  $e$  (рис. 2б, 2г). Они максимальны в тропиках (хотя КМ ИФА РАН завышает эмиссии в Амазонии и занижает в долине реки Конго). В бореальном регионе отмечается занижение эмиссий в Забайкалье, связанное, по-видимому, с теми же причинами, что и занижение  $R$  в этом регионе.

#### 3.2. Изменение характеристик природных пожаров в XXI–XXIII веках

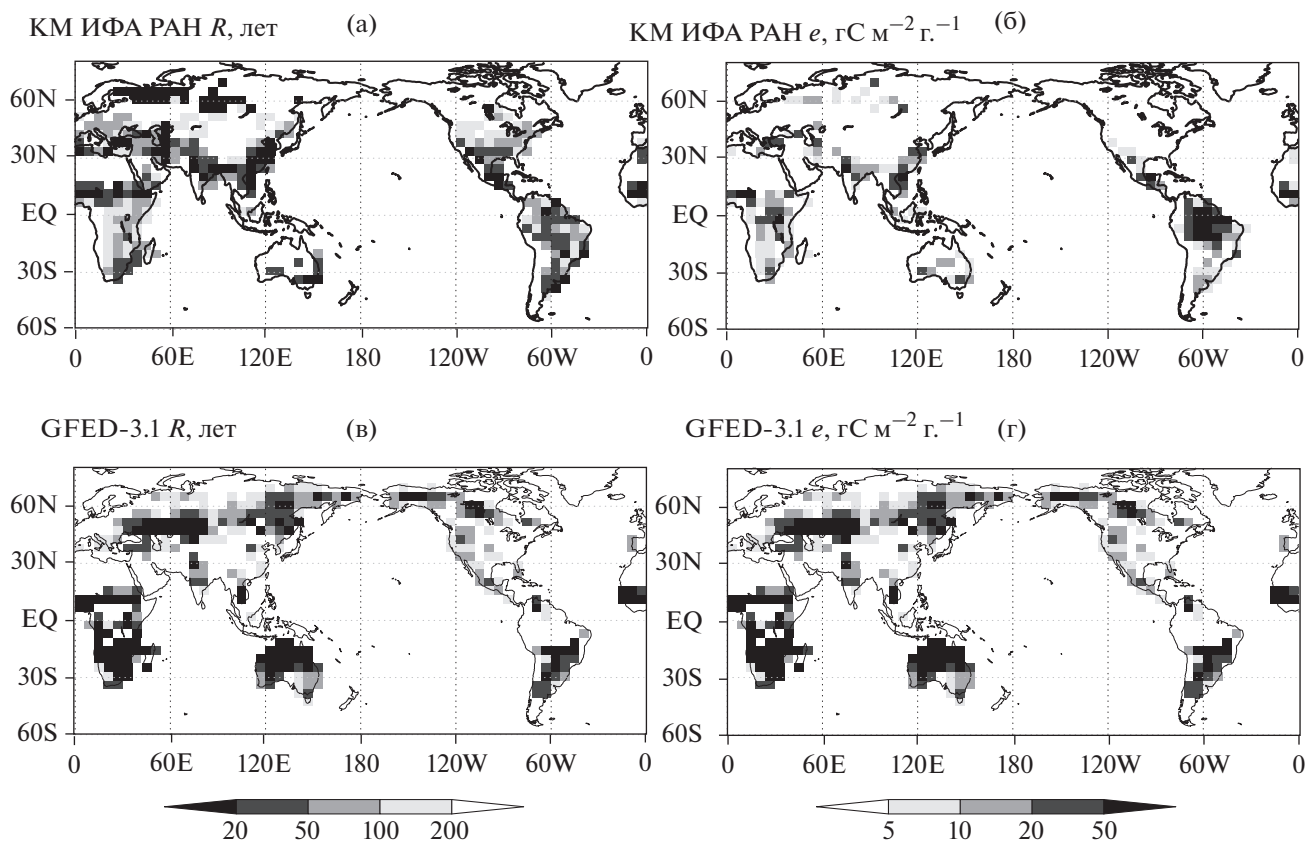
В XXI–XXIII веках при обоих сценариях RCP происходит общее увеличение площади выгорания из-за природных пожаров и соответствующих эмиссий CO<sub>2</sub> в атмосферу (рис. 1). Для варианта 1 в 2090–2100 гг.  $S_g$  увеличивается до  $5.2 \pm 0.1$  млн км<sup>2</sup> г<sup>-1</sup> ( $6.2 \pm 0.1$  млн км<sup>2</sup> г<sup>-1</sup>) при сценарии RCP 4.5 (RCP 8.5), т.е. на 22% (44%) относительно 1998–2011 гг. В 2290–2300 гг.  $S_g$  соответственно достигает  $5.3 \pm 0.1$  млн. км<sup>2</sup> г<sup>-1</sup> ( $6.8 \pm 0.1$  млн. км<sup>2</sup> г<sup>-1</sup>), т.е. увеличивается еще на 0.5% (11%) относительно последнего десятилетия XXI в. Глобальные эмиссии CO<sub>2</sub> в атмосферу при этом в 2090–2100 гг. увеличиваются до  $2.0 \pm 0.1$  ПгС г<sup>-1</sup> ( $1.8 \pm 0.1$  ПгС г<sup>-1</sup>), т.е. на 47% (39%) относительно 1998–2011 гг. В 2290–2300 гг.  $E_g$  составляют  $1.9 \pm 0.1$  ПгС г<sup>-1</sup> ( $2.0 \pm 0.1$  ПгС г<sup>-1</sup>), т.е. изменяются на  $-1.5\%$  ( $+10\%$ ) относительно 2090–2100 гг.

Увеличение  $E_g$  для варианта 1 модели в XXI в. при сценарии RCP 4.5 находится внутри интервала 22–66%, полученного для этого же столетия в [6] в расчетах с моделью наземного углеродного цикла, в которой атмосферное воздействие было задано по результатам численных экспериментов с климатическими моделями общей циркуляции при сценарии SRES A1B (который был использован при подготовке данных для плотности населения Земли для сценария RCP 4.5 в данной работе).

В то же время относительное увеличение  $S_g$  в XXI в. и особенно в XXII–XXIII вв. для варианта 1 при обоих сценариях RCP несколько меньше полученного в [9, 10] с версией КМ ИФА РАН, в которой использовалось предположение о том, что источники возгорания не ограничивают крупномасштабные среднегодовые характеристики ПП. Еще более заметные различия площади выгорания отмечены для  $E_g$  в XXII–XXIII вв.: если в данной работе интенсивность этих эмиссий уменьшается при сценарии RCP 4.5 и лишь немного увеличивается при сценарии RCP 8.5, то в [9, 10] при обоих сценариях отмечалось значительное увеличение  $E_g$  в указанный период.



**Рис. 1.** Глобальные значения годовой площади выгорания из-за природных пожаров (а) и соответствующих эмиссий  $\text{CO}_2$  в атмосферу (б) в численных экспериментах с вариантами 1–3 КМ ИФА РАН. Прямоугольниками представлены соответствующие эмпирические оценки [8] (а) и GFED-3.1 (б).



**Рис. 2.** Период повторяемости пожаров  $R$  (а, в) и эмиссии  $\text{CO}_2$  в атмосферу из-за природных пожаров с единицы площади  $e$  в 1997–2011 гг. (б, г) в численном эксперименте с вариантом 1 с КМ ИФА РАН (а, б) и по эмпирическим данным GFED-3.1 (в, г). Для  $R$  по данным GFED-3.1 исключены модельные ячейки, подверженные влиянию выгорания при антропогенной дефорестации (см. [9]).

Учет источников возгорания принципиально изменяет региональные особенности отклика характеристик ПП на климатические изменения. В частности, для версии КМ ИФА РАН [9, 10] в XXI–XXIII вв. площадь выгорания в модельной ячейке и соответствующие эмиссии  $\text{CO}_2$  в атмосферу увеличивались преимущественно в регионах средних и субполярных широт. В свою очередь, для варианта 1 модели относительное увеличение  $S$  и  $e$  при обоих сценариях антропогенного воздействия на климат в XXI в. сравнимо между регионами тропиков и более высоких широт (рис. 3а–3г). Абсолютные изменения обеих переменных при этом в тропиках даже заметно превышают соответствующие изменения в более высоких широтах из-за более интенсивных современных значений этих переменных (см. рис. 2а, 2б). В XXII–XXIII вв., когда численность населения в расчетах перестает изменяться,  $S$  и  $e$ , подобно [9, 10], увеличиваются в средних и субполярных широтах (рис. 3д, 3е).

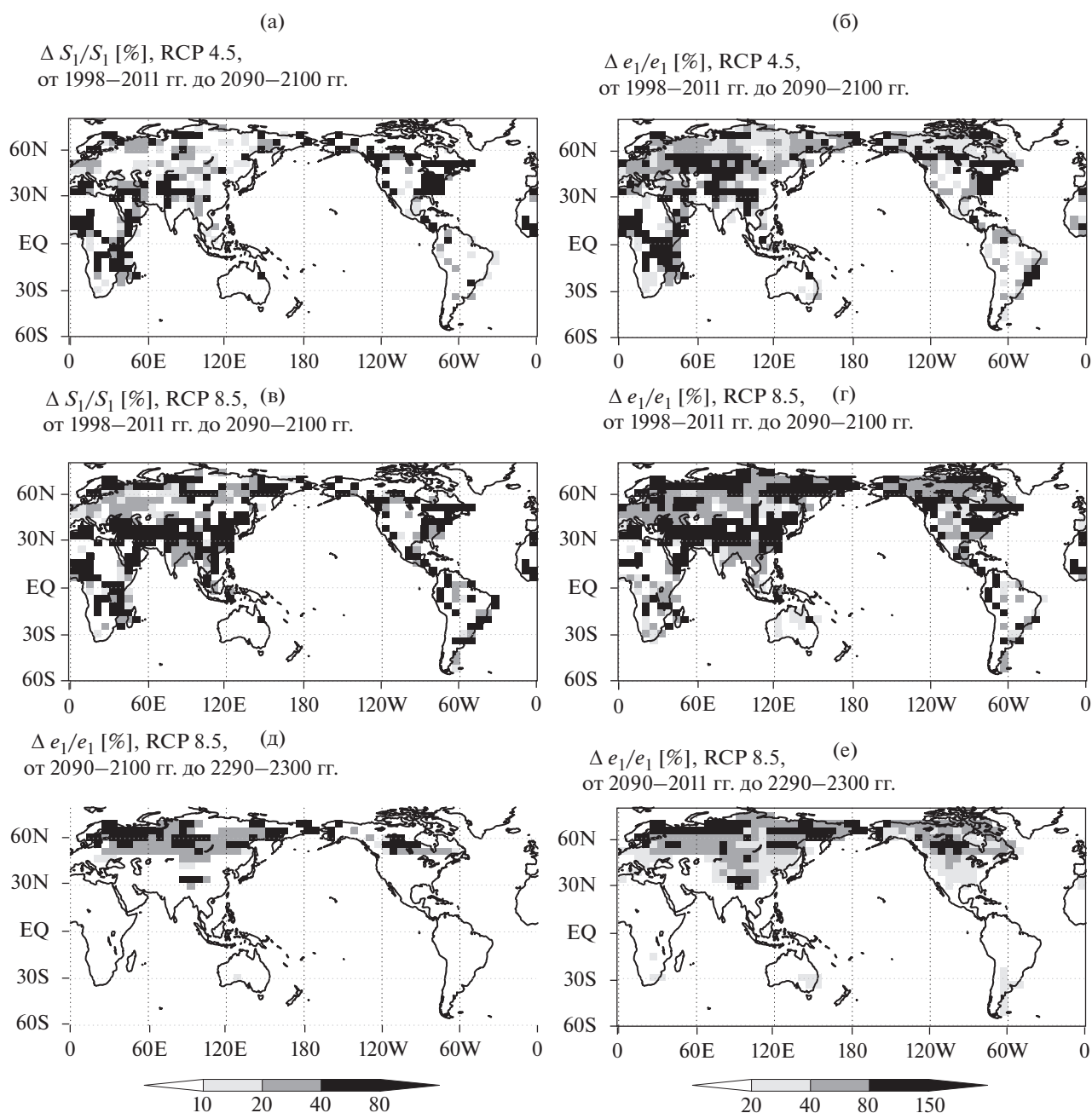
Таким образом, основную роль в различиях с ранее полученными результатами [9, 10] играет

влияние плотности населения на возникновение и подавление возникших ПП.

### 3.3. Вклад возгораний разного типа в характеристики природных пожаров

Изменение  $S_g$  и  $E_g$  в XIX–XXIII вв. в варианте 2 модели (без учета молниевых возгораний) близко к полученному в варианте 1 (рис. 1). В свою очередь, в варианте 3 без учета влияния деятельности человека на возникновение и подавление ПП обе переменные оказываются на два порядка меньше, чем в варианте 1.

Вклад естественных источников возгорания в глобальные характеристики ПП может быть оценен либо по отношениям  $S_{g,3}/S_{g,1}$  и  $E_{g,3}/E_{g,1}$ , либо с использованием  $(S_{g,1} - S_{g,2})/S_{g,1}$  и  $(E_{g,1} - E_{g,2})/E_{g,1}$  (здесь и далее числовым нижним индексом обозначен вариант расчета с КМ ИФА РАН). При первом подходе вклад молниевых возгораний в  $S_g$  не более 3%, а в  $E_g$  — не более 10% (рис. 4). При втором подходе, который учитывает нелинейность зависимости площади пожаров от числа

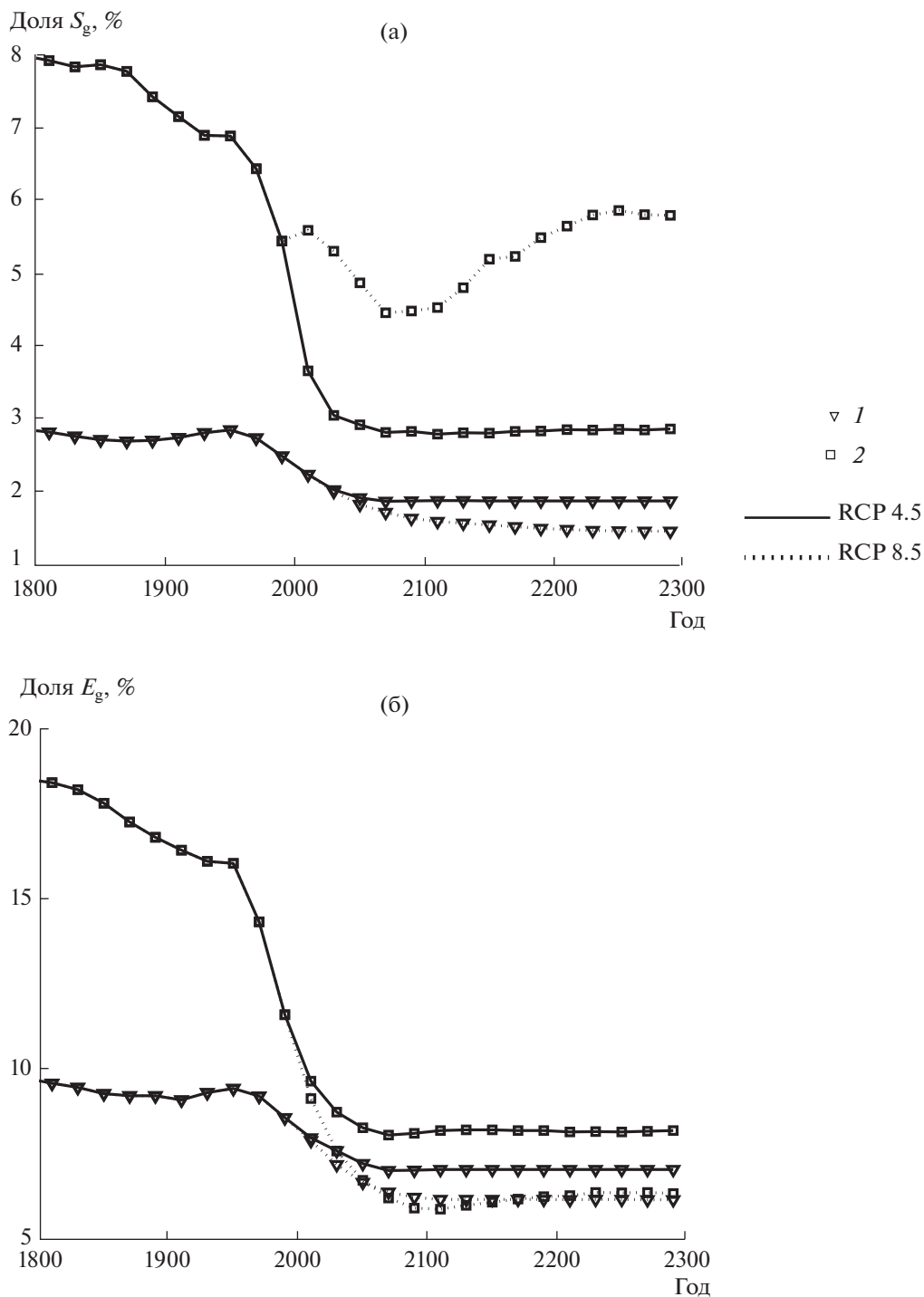


**Рис. 3.** Относительное изменение (проценты) площади выгорания  $S$  из-за природных пожаров в модельной ячейке (а, в, д) и соответствующих эмиссий  $\text{CO}_2$  в атмосферу  $e$  (б, г, е) при разных сценариях антропогенного воздействия в XXI–XXIII вв. в численных экспериментах с вариантом 1 с КМ ИФА РАН.

возгораний (см. (б)), максимальный вклад молниевых возгораний в  $S_g$  увеличивается до 8%, а в  $E_g$  — до 18%. Для обоих подходов больший вклад молниевых возгораний в глобальную площадь выгорания по сравнению с соответствующим вкладом в эмиссии  $\text{CO}_2$  в атмосферу из-за ПП связан с тем, что молниевые вспышки наиболее часты в тропиках, где  $c_{f,v}$  максимален. Кроме того, для обоих подходов вклад молниевых возгораний

в  $S_g$  и  $E_g$  уменьшается при увеличении антропогенной нагрузки на климат. Последнее, однако, должно измениться, по крайней мере количественно, при учете отклика частоты молниевых вспышек на изменения климата [20, 21].

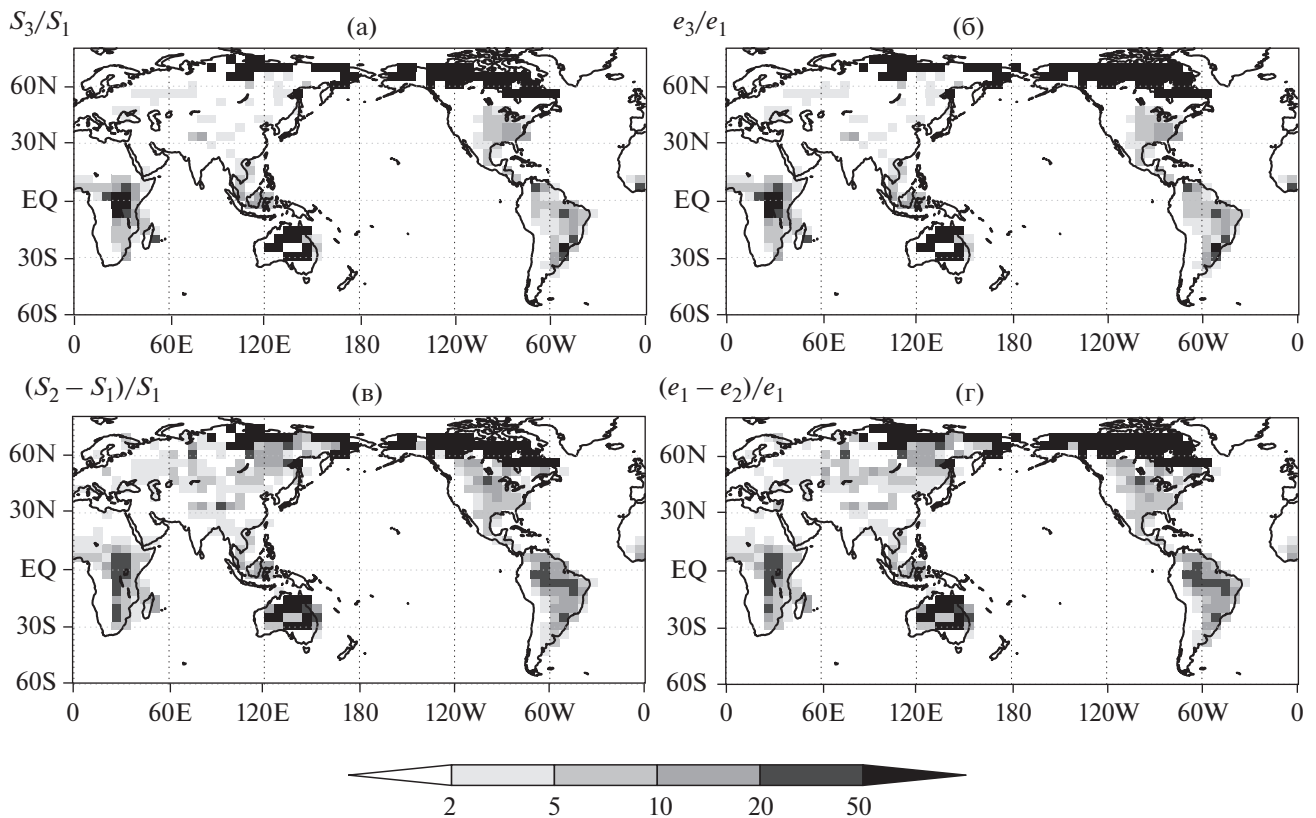
На субконтинентальном масштабе вклад молниевых возгораний в увеличение площади выгорания  $S$  и соответствующие эмиссии  $\text{CO}_2$  в атмосферу  $e$  может быть оценен с использованием



**Рис. 4.** Вклад молниевых возгораний в глобальную годовую площадь выгорания (а) и эмиссий CO<sub>2</sub> в атмосферу (б) из-за природных пожаров. Представлены оценки  $Y_3/Y_1$  (1) и  $(Y_1 - Y_2)/Y_1$  (2), где  $Y = S_g, E_g$ , а числовой нижний индекс указывает на вариант КМ ИФА РАН.

указанных выше двух подходов, но с заменой  $S_g$  на  $S$ , а  $E_g$  — на  $e$ . При обоих подходах вклад молниевых возгораний в частоту повторяемости пожаров и эмиссии CO<sub>2</sub> в атмосферу максимален в субарктических широтах, где молниевые возгорания являются основным источником ПП (рис. 5а, 5б).

Вторичный максимум этого вклада выявлен в тропиках, где молнии наиболее часты. В тропиках для обеих переменных до четверти (в регионах Австралии — больше половины) соответствующих значений в расчетах с вариантом 1 модели обусловлено молниевыми возгораниями. Ло-



**Рис. 5.** Вклад (проценты) молниевых возгораний в годовую площадь выгорания (а, в) и эмиссий  $\text{CO}_2$  в атмосферу (б, г) из-за природных пожаров в 1998–2011 гг. Представлены оценки  $Y_3/Y_1$  (а, б) и  $(Y_1 - Y_2)/Y_1$  (в, г), где  $\dot{Y} = S, e$ , а числовой нижний индекс указывает на вариант КМ ИФА РАН.

кальные максимумы вклада молниевых возгораний в увеличение площади выгорания отмечается и для ряда регионов средних широт Северного полушария, где до нескольких процентов площади выгорания и эмиссий  $\text{CO}_2$  в атмосферу связано с молниевыми вспышками. При оценке вклада молниевых возгораний в характеристики ПП по разности между численными экспериментами с вариантами 1 и 2 КМ ИФА РАН этот вклад значим также для внетропических регионов, что связано с нелинейностью соотношения (б) (рис. 5в, 5г). Полученные результаты в целом согласуются с глобальными модельными результатами [21], а на региональном уровне — также с эмпирическими оценками [19] для Европы и [16] для Канады. Пространственная структура вклада молниевых возгораний в увеличение  $S$  и  $e$  качественно мало меняется для разных временных периодов.

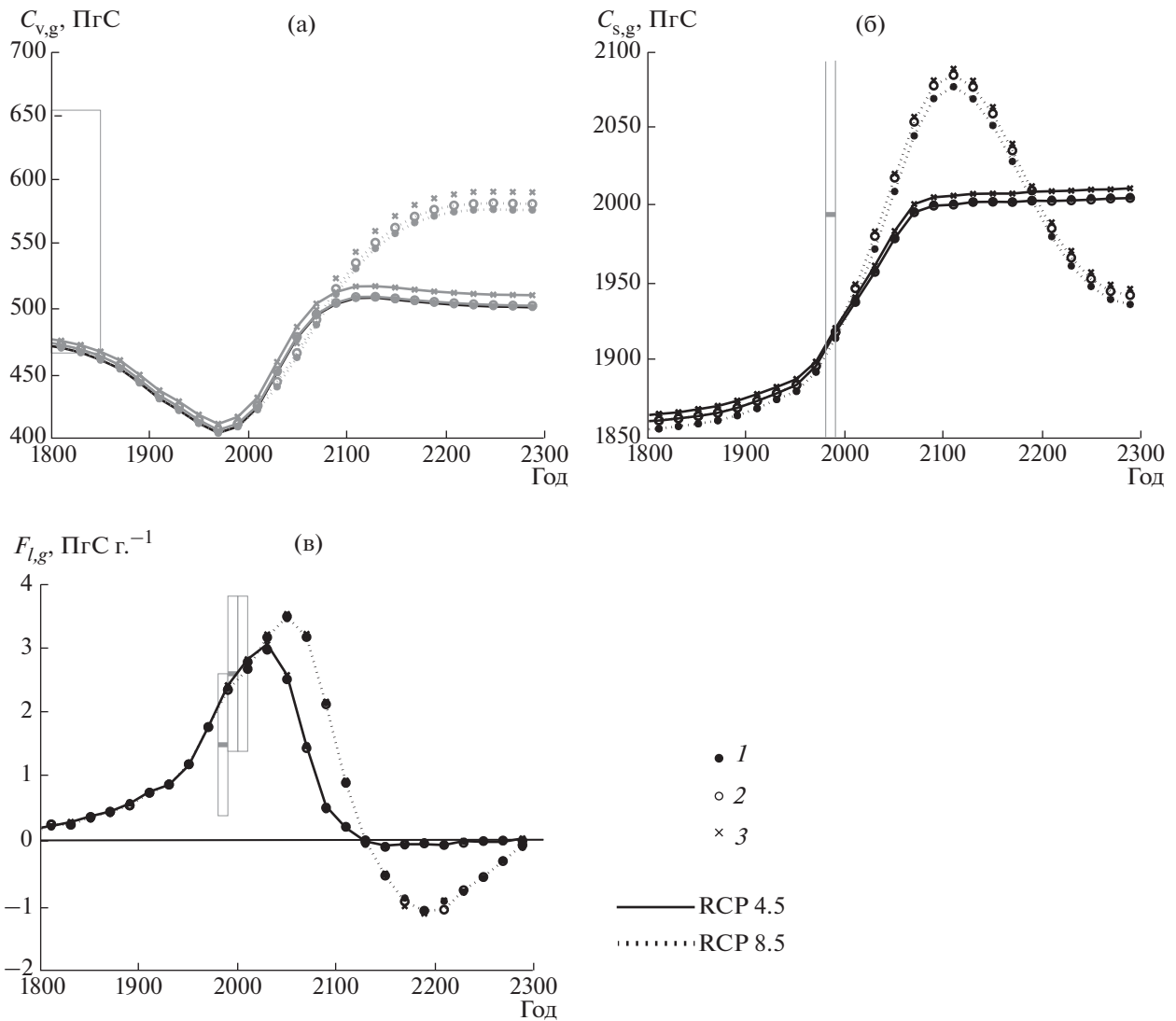
### 3.4 Влияние природных пожаров на характеристики наземной растительности и климата

Влияние природных пожаров на глобальные значения запаса углерода в растительности и почве и поток углерода между атмосферой и наземными экосистемами оказывается незначимым —

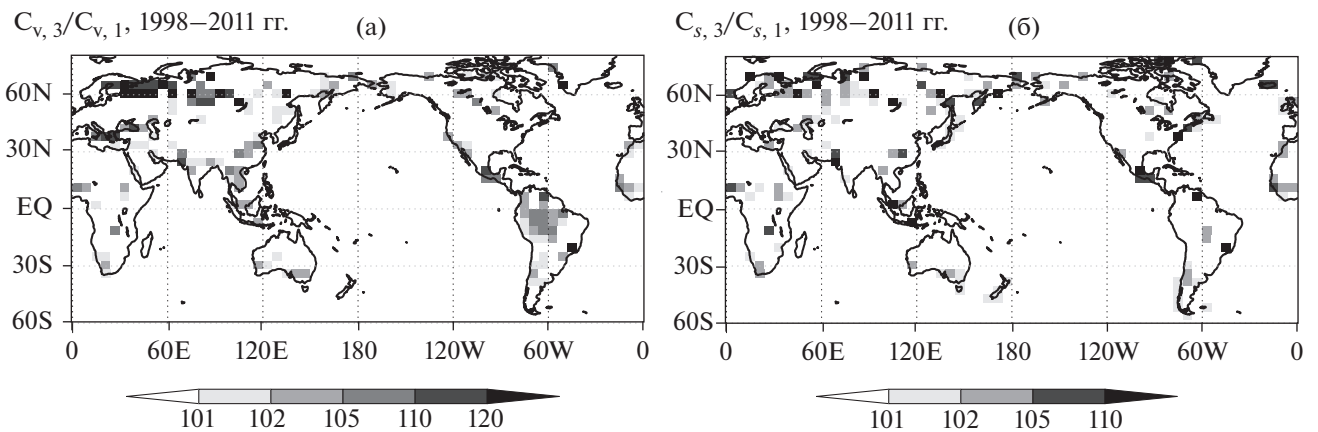
не более 2.5%, 0.6% и 2.5% соответственно (рис. 6; для последней переменной не учитывались временные периоды, когда этот поток мал по абсолютной величине). Однако даже на глобальном уровне ПП вносят заметный вклад в изменения за индустриальный период (вплоть до 1998–2011 гг.). В частности, для варианта 3 модели (соответствующего почти полному отсутствию природных пожаров) уменьшение глобального запаса углерода в почве за этот период меньше на 9%, а изменение запаса углерода в наземной растительности — меньше на 5% по сравнению с соответствующим изменением в расчете 1. В свою очередь, ПП незначимо сказываются на соответствующих изменениях содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере и приповерхностной температуры атмосферы (не более 0.5%).

На субконтинентальном пространственном масштабе влияние ПП получено достаточно значимым. В частности, в регионах, где наиболее велик вклад пожаров антропогенного происхождения, исключение пожаров этого типа увеличивает запас углерода в растительности на 10% и более (рис. 7а). Запас углерода в почве при этом также увеличивается на несколько процентов (рис. 7б). Эта структура не меняется качественно для раз-





**Рис. 6.** Запас углерода в наземной растительности (а) и почве (б), а также поток углерода из атмосферы в наземные экосистемы (в) в численных экспериментах с вариантами 1–3 с КМ ИФА РАН. Прямоугольниками показаны соответствующие эмпирические оценки по данным [37] (а), [38] (б) и [7] (в) и их интервалы неопределенности.



**Рис. 7.** Изменение по отношению к расчету с полной версией КМ ИФА РАН запаса углерода в наземной растительности (а, в) и почве (б, в) в 1998–2011 гг. при учете только молниевых возгораний (а, б) и только антропогенных возгораний (в, г).

ных временных периодов и при разных сценариях антропогенного воздействия.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе схема природных пожаров КМ ИФА РАН расширена учетом влияния молниевой активности и плотности населения на частоту возгораний и подавление пожаров. С моделью проведены численные эксперименты в соответствии с условиями проекта сравнения климатических моделей CMIP5. Частота молниевых вспышек в этих расчетах была задана в соответствии со спутниковыми данными LIS/OTD. Плотность населения задавалась по реконструкциям и статистическим данным для 1700–2005 гг., по комбинированным сценариям SRES-RCP — для XXI в., а в 2100–2300 гг. была зафиксирована на уровне 2100 г.

Модель в целом реалистично воспроизводит общую пространственную структуру площади выгорания из-за природных пожаров и соответствующие эмиссии в современный период в сравнении с данными GFED-3.1. Неточности воспроизведения характеристик ПП, проявляющиеся, однако, в ряде регионов, можно связать с неточностями воспроизведения климатических переменных (прежде всего — влагосодержания почвы) и с недостаточной репрезентативностью массива данных GFED-3.1.

Вклад молниевых возгораний в площадь выгорания  $S$  из-за ПП и эмиссии  $\text{CO}_2$  в атмосферу  $e$  максимален в субполярных широтах, где молниевые возгорания являются основным источником ПП. До четверти значений этих переменных можно связать с молниевыми возгораниями в тропиках. В ряде регионов средних широт до нескольких процентов  $S$  и  $e$  связано с молниевыми вспышками.

Учет связи числа пожаров с молниевой активностью и плотностью населения в модели принципиально меняет отклик характеристик природных пожаров на изменения климата. Так, в более ранней версии КМ ИФА РАН без учета влияния источников возгорания на крупномасштабные характеристики ПП при внешних воздействиях на климат изменения  $S$  и  $e$  были наиболее значимыми в средних и субполярных широтах. В данной работе характеристики природных пожаров значительно меняются в XXI в. также в тропиках и субтропиках. В XXII–XXIII вв., когда численность населения в расчетах перестает изменяться,  $S$  и  $e$  увеличиваются в средних и субполярных широтах, что качественно согласуется с результатами, полученными с более ранней версией КМ ИФА РАН. Основную роль в различиях между данной работой, с одной стороны, и более ранней версией КМ ИФА РАН — с другой, играет влия-

ние плотности населения на возникновение и подавление возникших ПП.

Малый вклад молниевой активности в число возгораний, полученный в данной работе, является следствием предположения об аддитивности молниевых и антропогенных источников возгораний (соотношение (4)). Подобное предположение используется также в модели SPITFIRE [2]. При других предположениях о взаимодействии молниевых и антропогенных источников возгораний (например, [6]) оценки доли вклада молниевой активности в площадь выгорания из-за ПП и в соответствующие эмиссии  $\text{CO}_2$  в атмосферу могут измениться по сравнению с результатами, полученными в данной работе [21].

Следует подчеркнуть также, что в численных экспериментах, представленных в данной работе, молниевая активность не рассчитывалась интерактивно, а задавалась по данным наблюдений. Интенсификация этой активности, ожидаемая при антропогенном потеплении климата в ближайшие столетия [20], способна изменить и отклик характеристик природных пожаров на внешние (включая антропогенные) воздействия на земную климатическую систему. С учетом выявленного в данной работе заметного влияния природных пожаров на запас углерода в наземных экосистемах отдельных регионов могут модифицироваться и характеристики наземного углеродного цикла.

Работа была выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-47-00049).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thonicke K., Venevsky S., Stich S. et al. The role of fire disturbance for global vegetation dynamics: coupling fire into a Dynamic Global Vegetation Model // *Glob. Environ. Biol.* 2001. V. 10. № 6. P. 661–677.
2. Thonicke K., Spessa A., Prentice I.C. et al. The influence of vegetation, fire spread and fire behaviour on biomass burning and trace gas emissions: results from a process-based model // *Biogeosciences*. 2010. V. 7. № 6. P. 1991–2011.
3. Van der Werf G.R., Randerson J.T., Giglio L. et al. Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009) // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V. 10. № 23. P. 11707–11735.
4. Еланский Н.Ф., Мохов И.И., Беликов И.Б. и др. Газовый состав приземной атмосферы в г. Москве в экстремальных условиях лета 2010 г. // *ДАН*. 2011. Т. 437. № 1. С. 90–96.
5. Еланский Н.Ф., Мохов И.И., Беликов И.Б. и др. Газовые примеси атмосферы над Москвой летом 2010 г. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2011. Т. 47. № 6. С. 671–682.

6. *Kloster S., Mahowald N.M., Randerson J.T., et al.* The impacts of climate, land use, and demography on fires during the 21st century simulated by CLM-CN // *Biogeosciences*. 2012. V. 9. № 1. P. 509–525.
7. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis / Eds. Stocker T., Qin D., Plattner G.-K. et al.* Cambridge/New York: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
8. *Yue C., Ciais P., Cadule P. et al.* 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 // *Geosci. Model. Devel.* 2014. V. 7. № 6. P. 2747–2767.
9. *Eliseev A.V., Mokhov I.I., Chernokulsky A.V.* An ensemble approach to simulate CO<sub>2</sub> emissions from natural fires // *Biogeosciences*. 2014. V. 11. № 12. С. 3205–3223.
10. *Eliseev A.V., Mokhov I.I., Чернокульский А.В.* Влияние низовых и торфяных пожаров на эмиссии CO<sub>2</sub> в атмосферу // *ДАН*. 2014. Т. 459. № 4. С. 496–500.
11. *Мохов И.И., Елисеев А.В.* Моделирование глобальных климатических изменений в XX–XXIII веках при новых сценариях антропогенных воздействий RCP // *ДАН*. 2012. Т. 443. № 6. С. 732–736.
12. *Мохов И.И., Семенов В.А., Хон В.Ч.* Оценки возможных региональных изменений гидрологического режима в XXI веке на основе глобальных климатических моделей // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2003. Т. 39. № 2. С. 150–165.
13. *Мохов И.И., Дюфрен Ж.Л., Ле Трет Э. и др.* Изменения режимов засух и биопродуктивности наземных экосистем в регионах северной Евразии по расчетам с глобальной климатической моделью с углеродным циклом // *ДАН*. 2005. Т. 405. № 6. С. 810–814.
14. *Мохов И.И., Чернокульский А.В., Школьник И.М.* Региональные модельные оценки пожароопасности при глобальных изменениях климата // *ДАН*. 2006. Т. 411. № 6. С. 808–811.
15. *Мохов И.И., Чернокульский А.В.* Региональные модельные оценки риска лесных пожаров в азиатской части России при изменениях климата // *География и природные ресурсы*. 2010. № 2. С. 120–126.
16. *Stocks B.J., Mason J.A., Todd J.B. et al.* Large forest fires in Canada, 1959–1997 // *J. Geophys. Res.: Atmospheres*. 2002. V. 107. № 1. 8149.
17. *Pechony O., Shindell D.T.* Fire parameterization on a global scale // *J. Geophys. Res.: Atmospheres*. 2009. V. 114. № 16. D16115.
18. *Chernokulsky A.V., Bulygina O.N., Mokhov I.I.* Recent variations of cloudiness over Russia from surface daytime observations // *Environ. Res. Lett.* 2011. V. 6. № 3. 035202
19. *Ganteaume A., Camia A., Jappiot M. et al.* A review of the main driving factors of forest fire ignition over Europe // *Environ. Management*. 2013. V. 51. № 3. P. 651–662.
20. *Price C.G.* Lightning applications in weather and climate research // *Surv. Geophys.* 2013. V. 34. № 6. P. 755–767.
21. *Krause A., Kloster S., Wilkenskjeld S. et al.* The sensitivity of global wildfires to simulated past, present, and future lightning frequency // *J. Geophys. Res.: Biogeosciences*. 2014. V. 119. № 3. P. 312–322.
22. *Мохов И.И., Демченко П.Ф., Елисеев А.В. и др.* Оценки глобальных и региональных изменений климата в XIX–XXI веках на основе модели ИФА РАН с учетом антропогенных воздействий // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2002. Т. 38. № 5. С. 629–642.
23. *Мохов И.И., Елисеев А.В., Демченко П.Ф. и др.* Климатические изменения и их оценки с использованием глобальной модели ИФА РАН // *ДАН*. 2005. Т. 402. № 2. С. 243–247.
24. *Елисеев А.В.* Оценка изменения характеристик климата и углеродного цикла в XXI веке с учетом неопределенности значений параметров наземной биоты // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2011. Т. 47. № 2. С. 147–170.
25. *Eliseev A.V., Mokhov I.I.* Uncertainty of climate response to natural and anthropogenic forcings due to different land use scenarios // *Adv. Atmos. Sci.* 2011. V. 28. № 5. P. 1215–1232.
26. *Van Vuuren D.P., Edmonds J., Kainuma M. et al.* The Representative Concentration Pathways: an overview // *Clim. Change*. 2011. V. 109. № 1–2. P. 5–31.
27. *Мохов И.И., Елисеев А.В., Карпенко А.А.* Чувствительность к антропогенным воздействиям глобальной климатической модели ИФА РАН с интерактивным углеродным циклом // *ДАН*. 2006. Т. 407. № 3. С. 400–404.
28. *Eliseev A.V., Mokhov I.I.* Carbon cycle-climate feedback sensitivity to parameter changes of a zero-dimensional terrestrial carbon cycle scheme in a climate model of intermediate complexity // *Theor. Appl. Climatol.* 2007. V. 89. № 1–2. P. 9–24.
29. *Елисеев А.В., Мохов И.И., Карпенко А.А.* Вариации климата и углеродного цикла в XX–XXI веках в модели промежуточной сложности // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2007. Т. 43. № 1. С. 3–17.
30. *Sedano F., Randerson J.T.* Multi-scale influence of vapor pressure deficit on fire ignition and spread in boreal forest ecosystems // *Biogeosciences*. 2014. V. 11. № 14. P. 3739–3755.
31. *Van Leeuwen T.T., van der Werf G.R., Hoffmann A.A. et al.* Biomass burning fuel consumption rates: a field measurement database // *Biogeosciences*. V. 11. № 24. P. 7305–7329.
32. *Cecil D.J., Buechler D.E., Blakeslee R.J.* Gridded lightning climatology from TRMM-LIS and OTD: Dataset description // *Atmos. Res.* 2014. V. 135–136. P. 404–414.
33. *Смышляев С.П., Мареев Е.А., Галин В.Я.* Моделирование влияния грозовой активности на газовый состав атмосферы // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2007. Т. 46. № 4. С. 487–504.

34. Klein Goldewijk K., Beusen A., van Drecht G. et al. The HYDE 3.1 spatially explicit database of human-induced global land-use change over the past 12,000 years // *Glob. Ecol. Biogeogr.* 2011. V. 20. № 1. P. 73–86.
35. Van der Werf G., Randerson J., Giglio L. et al. Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009) // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V. 10. № 23. P. 11707–11735.
36. Обязов В.А. Влияние изменений метеорологических условий на лесопожарную обстановку в Забайкальском крае // *Метеорология и гидрология.* 2012. № 6. С. 27–35.
37. *Climate Change 2001: The Scientific Basis* / Eds. Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J. et al. Cambridge/New York: Cambridge University Press., 2001. 881 p.
38. Jobbágy E.G., Jackson R.G. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation // *Ecol. Appl.* 2000. V. 10. № 2. P. 423–486.

## The Influence of Lightning Activity and Anthropogenic Factors on Large-Scale Characteristics of Natural Fires

A. V. Eliseev\*, I. I. Mokhov, and A. V. Chernokul'skii

*Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Pyzhevskii per. 3, 119017 Russia*

\*e-mail: eliseev@ifaran.ru

Received June 16, 2015; in final form, November 20, 2015

**Abstract**—A pattern of natural fires (NFs) in the climate model of the Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences (IAP RAS CM), is expanded with respect to the influence of lightning activity and population density on the ignition frequency and fire suppression. The IAP RAS CM is used to perform numerical experiments in accordance with the conditions of the project that intercompares climate models, CMIP5 (Coupled Models Intercomparison Project, phase 5). The frequency of lightning flashes was assigned in accordance with the LIS/OTD satellite data. In the calculations performed, anthropogenic ignitions play an important role in NF occurrences, except for regions at subpolar latitudes and, to a lesser degree, tropical and subtropical regions. Taking into account the dependence of fire frequency on lightning activity and population density intensifies the influence of characteristics of natural fires on the climate changes in tropics and subtropics as compared to the version of the IAP RAS CM that does not take the influence of ignition sources on the large-scale characteristics of NFs into consideration.

**Keywords:** IAP RAS CM, natural fires, ignition sources, RCP scenarios