

# ЭМИССИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ВСЛЕДСТВИЕ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ В РОССИИ 1998-2010 гг.

А. З. Швиденко<sup>1,4</sup>, Д. Г. Щепашенко<sup>1,2</sup>, Е. А. Ваганов<sup>3,4</sup>, А. И. Сухинин<sup>4</sup>, Ш. Ш. Максютов<sup>5</sup>, И. МкКаллум<sup>1</sup>

Природные пожары являются наиболее опасным экзогенным нарушением в лесах России. Особенности климатических изменений последних десятилетий существенно усиливают угрозу возникновения и распространения разрушающих природных, особенно лесных пожаров. Тренд увеличения температуры на территории России в последние десятилетия был значительно выше глобального: соответственно, 0.51 and 0.17 °C / 10 лет в 1976-2008 гг. Хотя в последние годы наблюдается некоторое замедление темпов глобального потепления, рост годовых температур в России продолжается [Росгидромет, 2011]. Среднее количество осадков по стране несколько увеличивается (0.71 мм / мес. / 10 лет в 1976-2010 гг. в сравнении с базовым периодом 1961-1990 гг.), однако для юга Европейской и континентальных районов Азиатской частей России наблюдаемый тренд изменения количества осадков близок к нулю, а сухость климата (измеряемая, например, показателями типа индекса суровости засухи Палмерса) значимо возрастает, продолжая тенденции предыдущих десятилетий [Lapenis et al., 2005].

Существенно увеличивается изменчивость погоды, выражающаяся в чередовании периодов с ливневыми осадками и длительных теплых и сухих периодов, иногда с аномальной жарой, как летом 2010 года в центре Европейской России. Такая специфика создает угрозу возникновения и распространения на большие площади природных, в первую очередь лесных пожаров высокой интенсивности, т.н. катастрофических пожаров [Efremov, Shvidenko, 2004; Сухинин 2010]. Такие пожары приводят к глубокой деградации экосистем и обеднению биоразнообразия, создают особое состояние атмосферы и сезонной погоды на огромных площадях, наносят значительный вред экономике и инфраструктуре, а также крайне негативно влияют на условия жизни и здоровье населения в регионах распространения пожаров. Эта ситуация усугубляется существенным снижением уровня управляемости природными ресурсами в стране, деградацией гражданского самосознания и разрушением профессиональных природоохранительных систем (в частности, практической ликвидацией государственной лесной охраны).

На протяжении последних двух десятилетий катастрофические пожарные ситуации в различных регионах России, как правило, в ее Азиатской части, наблюдаются почти ежегодно с повторяемостью

около 10 лет [Рубцов и др., 2010]. Экологические последствия катастрофических пожаров значительны. По оценкам, единичные или повторяющиеся катастрофические лесные пожары в течение последних лет увеличили в Дальневосточном регионе общую площадь территорий, лишенных леса, на 8 миллионов га. Около трети лесных площадей, пройденных такими пожарами, превращаются в непродуктивные территории, на которых естественное восстановление лесов не происходит в течение 2-3 циклов развития основных лесобразователей (т.е. 300-600 лет) [Efremov, Shvidenko, 2004]. Эта часть представлена в основном болотами (до 70%), мелкими кустарниками и травой (15%), рединами (10%) и каменистыми полями и обнажениями (5%).

Пожарные эмиссии существенно влияют на климатическую систему Земли. Однако опубликованные оценки площадей природных пожаров на территории России и производимых ими эмиссий парниковых газов существенно различаются (напр., [Вивчар и др., 2010; Soja et al., 2004]). Это объясняется различиями в методах оценки и, главное, полнотой и надежностью использованных авторами данных. Официальная статистика ограничена только «лесной площадью, пройденной пожарами» [Росстат, 2010. Доступно также на [http://www.gks.ru/bgd/regl/b10\\_14p/Main.htm](http://www.gks.ru/bgd/regl/b10_14p/Main.htm)], которые ниже фактических площадей природных пожаров в среднем в 5-7 раз.

Современные спутниковые системы, такие как NOAA/AVHRR, Terra/Aqua/MODIS, ENVISAT/MERIS, Terra/ASTER и др., позволяют существенно улучшить наше знание о распространении и интенсивности пожаров, их влиянии на экосистемы и углеродные эмиссии. Однако применение этих методов нетривиально, требует адекватных средств моделирования и знания характеристик растительности подстилающей территории. Цель настоящей работы — представить максимально точную верифицированную оценку площадей и пространственного распространения растительных пожаров на территории России, а также произведенных ими углеродных эмиссий за период 1998-2010 гг., базируясь на системном применении дистанционных методов и количественных оценках основных биофизических характеристик растительного покрова.

Горение биомассы является источником многих парниковых газов (Crutzen et al. 1979, 1985;

<sup>1</sup>Международный институт прикладного системного анализа (Лаксенбург, Австрия)

<sup>2</sup>Московский государственный университет леса

<sup>3</sup>Сибирский федеральный университет (Красноярск)

<sup>4</sup>Институт леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения РАН (Красноярск)

<sup>5</sup>Национальный институт исследований внешней среды (Тсукуба, Япония)

Andrea et al. 1988; Cofer et al., 1989). Мы включили в рассмотрение основные парниковые газы и твердые частицы, главным образом те, которые учитываются Киотским протоколом, в частности CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, неметановые летучие органические вещества (NMVOC), соединения азота (N<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub>). Некоторые другие газы с высоким радиационным эффектом [такие как молекулярный азот (N<sub>2</sub>), аммоний (NH<sub>3</sub>), метил хлорид CH<sub>3</sub>Cl, метил бромид (CH<sub>2</sub>Br)], некоторые соединения серы (в основном SO<sub>2</sub>), твердые частицы (в т.ч. органический и элементный углерод) также были включены в рассмотрение.

Углеродистые частицы (такие как PM<sub>2.5</sub> и общее количество TPM) в пограничных слоях тропосферы могут как рассеивать, так и поглощать солнечную радиацию. Две формы дымовых аэрозолей, органический углерод (OC) и элементный углерод (EC), являются радиационно активными компонентами; первый из них рассеивает и второй может как рассеивать, так и поглощать радиацию. Оценки глобальных эмиссий OC и EC свидетельствуют, что горение биомассы поставляет в тропосферу значительные количества этих радиационно важных углеродистых частиц: 69 Tg C год<sup>-1</sup> для OC и 19 Tg C год<sup>-1</sup> для EC [Andrea, 1990].

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОД

Для оценки биометрических характеристик и пространственного распределения наземных экосистем была использована Интегральная земельная информационная система России (ИЗИС), разработанная Международным институтом прикладного системного анализа (Австрия). ИЗИС представлена в виде многослойной геоинформационной системы, включающей гибридный земельный покров (hybrid land cover) и соответствующие атрибутивные базы данных. Эта информационная база построена на основе многодатчиковой концепции применения дистанционных методов (использовано 12 продуктов ДЗЗ из 8 спутников), измерений *in situ*, данных различных инвентаризаций и обследований (в т.ч. учет лесного фонда, учет земельного фонда, данные экологического мониторинга и других) и иной целесообразной информации. Классы земельного покрова устанавливались на основе типов растительности, т.е. покрытые лесом земли на торфяных почвах учитывались как лес, а в категорию болот относились только нелесные переувлажненные территории. Параметризация земельного покрова базировалась на принципе последовательного использования наиболее точных данных из доступного множества источников. В тех случаях, когда разрешение спутниковых данных было недостаточно для непосредственной попиксельной параметризации (например, для идентификации преобладающих древесных пород, оценки возраста или количества фитомассы в лесах), использовался алгоритм многомерной оптимизации, обеспечивающий максимальную вероятность пространственной идентификации и точность атрибутов для пространствен-

ных единиц размером порядка 15'x15'. В частности, ИЗИС содержит исчерпывающее описание количества и структуры горючих материалов (всего использовалось 12 типов горючих материалов, в том числе фитомасса деревьев по 7 фракциям; подрост и подлесок; живой напочвенный покров; сухостойная и валёжная древесина; органическое вещество подстилки и 1м верхнего слоя минеральной почвы) для каждого 1x1км пикселя по классам земельного покрова. В рамках иерархической классификации наземных экосистем, количество первичных классификационных единиц, для которых проводилась параметризация, колебалось от нескольких сотен (например, для естественных трав и кустарников) до десятков тысяч (для лесов). Более детальное описание структуры ИЗИС и алгоритма оптимизации приведено в [Schepaschenko et al., 2011].

Площади, пройденные пожарами, оценивались за каждый месяц пожароопасного сезона, используя 2, 3, 4 и 5 — каналы радиометра AVHRR со спутника NOAA (США) с использованием модифицированного алгоритма, описанного в [Soja et al., 2004]. Поскольку было установлено, что данные AVHRR завышают площадь пожаров, особенно для пожаров площадью до 10-15 тысяч гектаров, данные измерений корректировались на основе регрессий, разработанных для типичных таежных районов Сибири в Институте леса СО РАН. Распределение по видам пожаров (верховые, беглые низовые, устойчивые низовые и торфяные) оценивались по месяцам пожарного сезона на основе усредненных многолетних данных в пределах географических зон и классов растительности.

Интенсивность пожаров и доля сгораемого органического вещества корректировалась по регрессионным моделям, учитывающим период и продолжительность активного горения, а также по отношению площади пожаров по индивидуальным сезонам к многолетним средним в пределах административных регионов страны. Количество сгоревшей органики DFt (в единицах массы углерода) определялось ежемесячно для каждого пикселя и месяца t с использованием модифицированной формулы Зейлера и Крутцена [Seiler, Crutzen, 1980] как произведение общей пройденной огнем площади на вероятность типа пожара, количество горючих материалов, долю сгораемой органики и процент содержания углерода в сухой растительной массе.

$$DF_t = \sum_{ilkq} S_{ilkq} (FF)_{ilkq} C_{ijk} \gamma_{ilkq} \quad (1)$$

где  $S_{ilkq}$  — оценка площади пожара (га) земельного класса i (т.е. количество соседствующих пикселей с одинаковыми индикаторами) и типа пожара j,  $(FF)_{ilkq}$  обозначает количество горючего вещества (т га<sup>-1</sup> в абсолютно сухом состоянии) вида k,  $C_{ilkq}$  есть доля q горючих материалов, сгораемых во время пожара, и  $\gamma_{ijk}$  — коэффициент для пересчета сухой органической массы в углеродные единицы.

Состав газовых и твердых продуктов горения оценивался при помощи эмиссионных факторов (emission factors), представленных в последней версии базы данных Andrea [Таблица 1, Andrea, Merlet 2001; D'Andrea et al. 2010].

Состав продуктов горения (парниковые газы и частицы) зависит от типа пожара, интенсивности горения, взаимоотношение между фазами горения и т.д. Средняя оценка отношения сгоревшей органики на протяжении фаз активного горения (flaming phase) и тления (smoldering phase)

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ**

Общая площадь природных пожаров на территории России в 1998-2010 гг. составила 106.9 x 106 га или в среднем 8.23 x 106 га год<sup>-1</sup>, варьируя от 4.2 (1999) до 17.3 x 106 га год<sup>-1</sup> (2003) (рис.1). Это в 5.9 раз больше, чем средняя годовая площадь пожаров на лесных землях по официальным данным за 2000-2009 гг.— 1.40 x 106 га год<sup>-1</sup> [Росстат, 2010]. Хотя некоторый тренд увеличения сгоревших площадей в пределах рассматриваемого периода наблюдается, статистически значимого подтверждения он не имеет.

Таблица 1

**СРЕДНИЕ ЭМИССИОННЫЕ ФАКТОРЫ (D'ANDREA 2001, 2010) И ДОЛЯ СГОРЕВШИХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ (В ЕДИНИЦАХ УГЛЕРОДА)**

Продукты горения	Эмиссионный фактор, г/ кг св, по основным классам земельного покрова			Доля от общего количества сгоревших горючих материалов (в единицах углерода)		
	Лес	Травы и кустарники	С.-х. земли	Лес	Травы и кустарники	С.-х. земли
CO <sub>2</sub>	1572±126	1646±99	1308±532	0.857	0.976	0.793
CO	106±36	61±16	92±65	0.091	0.036	0.0876
CO/CO <sub>2</sub>	99±29	59±17	0±0			
CH <sub>4</sub>	4.8±1.8	2.8±0.8	8.4±8.0	0.0072	0.0036	0.014
NMHC	5.7±4.1	3.4±1.0	9.9±7.7	0.0057	0.0037	0.011
NO <sub>x</sub>	3.41±1.92	2.12±1.17	2.29±0.93			
N <sub>2</sub> O	0.26±0.07	0.21±0.10	0.10±0.09			
NH <sub>3</sub>	1.63±1.26	0.74±0.55	1.62±0.49			
CH <sub>2</sub> Cl	0.050±0.032	0.064±0.026	0.213±0.110			
CH <sub>2</sub> Br	0.032±0.0012	0.0017±0.0009	0.003±нд			
OC	9.1±9.2	3.2±3.1	4.2±3.3	0.0091	0.0035	0.0047
BC	0.56±0.19	0.46±0.17	0.42±0.30	0.0011	0.0010	0.0008
TC	8.3±8.2	3.7±1.3	6.2±нд	0.0149	0.0074	0.0104
PM <sub>2.5</sub>	12.8±6.7	4.9±1.5	8.3±6.2	0.0128	0.0053	0.0092
TPM	17.6±6.4	8.5±3.0	12.4±11.4	0.0176	0.0092	0.0138
SO <sub>2</sub>	2.64±нд	0.37±0.15	0.40±нд			

в среднем составила 60:40% при беглых низовых пожарах, 50:50% при верховых пожарах, 40:60% при устойчивых низовых и 15:85% при торфяных пожарах.

Как правило, 90-95% площадей, пройденных пожарами, находится в Азиатской части России, главным образом в ее южной половине. Исключением является 2010 год, когда беспрецедентная засуха и температурные аномалии вызвали катастрофическую вспышку пожаров в центральных областях Европейской части России (рис. 2). Больше половины (59.3%) сгоревших площадей находится на покрытых лесом землях, а вместе с рединами и поврежденными лесами (в основном, старые гари и леса, поврежденные насекомыми)— практически две трети (65.1%). Значительная часть пожаров наблюдается на сельскохозяйственных землях, как правило, вследствие различного рода профилактических выжиганий (18.9% общей площади). Пожары в естественных травяных и кустарниковых экосистемах составляют 8.7% и на болотах— 7.3% от общей

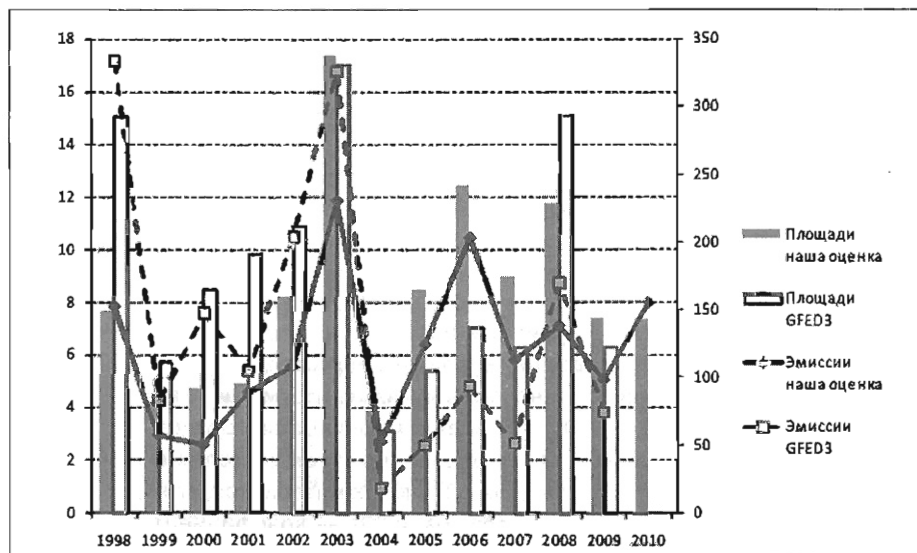


Рис. 1. Площади природных пожаров и пожарные эмиссии углерода на территории России в 1998-2010 гг.

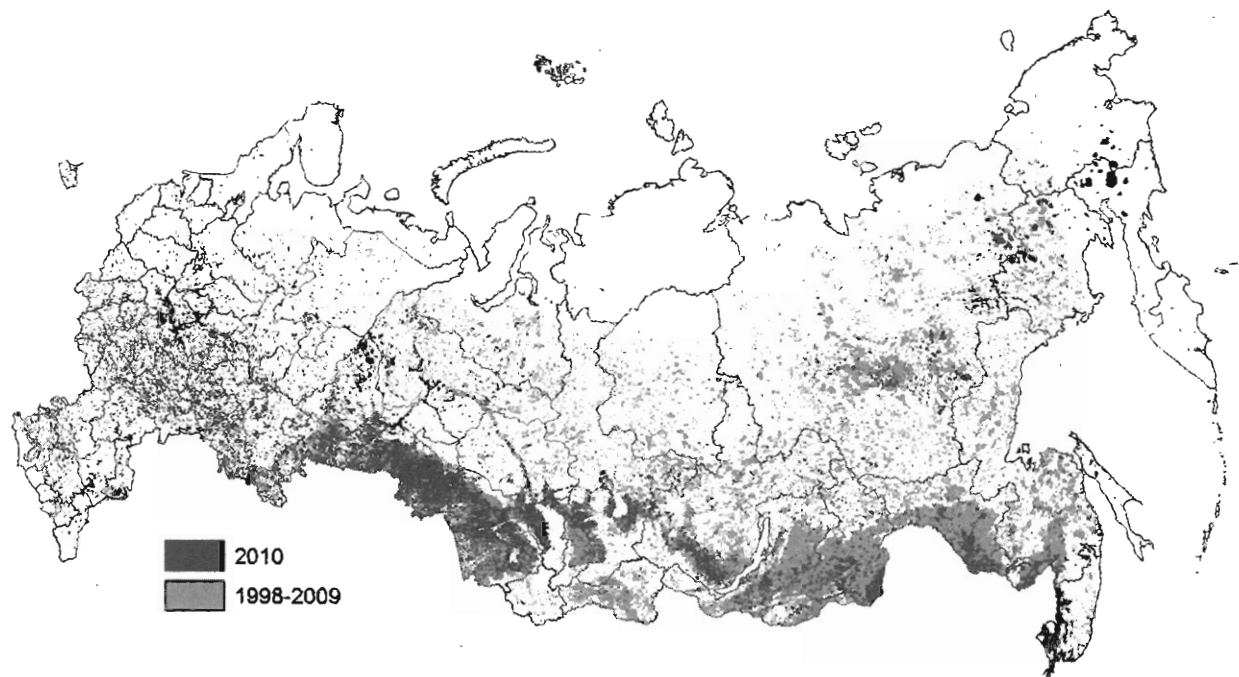


Рис. 2. Площади природных пожаров и пожарные эмиссии углерода на территории России в 1998-2010 гг.

площади, пройденной пожарами. В сезонном распределении площадей пожаров отчетливо выделяется два типа — весенний и позднелетний. Первому свойственен пик распространения пожаров весной, через некоторое короткое время после схода снежного покрова и до зеленения растительности. Второй тип имеет приближенно равномерное распределение площадей, иногда с усилением к концу пожароопасного сезона, являясь следствием аномально засушливых весны и лета. Для таких сезонов (1998, 2003, 2008, 2010 гг.) характерно значительное увеличение площадей верховых и устойчивых низовых пожаров, распространение огня в обычно негорючие болота и повышенный уровень эмиссий парниковых газов, в частности метана и оксида углерода за счет глубокого почвенного горения.

Количество органического вещества, сгоревшего в пожарах 1998-2010 гг., оценено в  $1.57 \times 10^9$  т углерода, или в среднем  $121.0 \text{ Тг} (= 106 \text{ т}) \text{ С год}^{-1}$ . Пожарные эмиссии составили около 2.4% чистой

первичной продукции экосистем, что практически совпадает со средней глобальной оценкой (2.5%, [Van Der Werf et al., 2010]). Как и в части площадей, межгодовая изменчивость этой величины высока — от 50 (2000 г.) до  $231 \text{ Тг С год}^{-1}$  (2003 г.), причем здесь влияние типа пожарного сезона и географической локализации пожаров существенно. Так, при среднем удельном потреблении углерода в 1998-2010 гг. (на всех категориях земельного покрова) в  $1.47 \text{ кг С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ , максимальное значение отмечено для 2010 года ( $2.12 \text{ кг С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ ), когда площадь, пройденная пожарами за сезон, была несколько ниже многолетней средней. Основную часть углеродных эмиссий поставляют лесные пожары (включая редины) — 76.0% от общего количества; на втором месте — пожары на болотах (15.8%), на которых средние удельные эмиссии наивысшие ( $3.06 \text{ кг С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ ), а при устойчивых торфяных пожарах могут превышать это значение в десятки раз.

Таблица 2

**ПОЖАРНЫЕ ЭМИССИИ ПО ВИДАМ ВЕЩЕСТВ, СОДЕРЖАЩИХ УГЛЕРОД**

Тип растительности	Площадь, тыс. га	Эмиссии, тыс. т С	включая основные углеродистые вещества, тыс. т С							
			CO <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	NMHC	OC	BC	PM <sub>2.5</sub>	TPM
Леса	4886	82036	68820	6920	836	599	835	82	878	1285
Пахотные земли	402	606	524	47	7	6	3	1	5	8
Сенокосы и пастбища	819	1,711	1,482	131	19	16	9	2	14	22
Залежи и заброшенные с/х земли	333	700	610	51	7	6	3	1	5	9
Болота	602	18425	15970	1369	251	108	109	18	126	200
Редины	261	6244	5148	593	81	43	61	6	73	105
Поврежденные леса	203	3688	3109	295	34	28	39	4	39	57
Травы и кустарники	720	7566	6665	488	83	42	44	8	49	80
Всего	8226	120976	102328	9894	1318	847	1103	121	1190	1765

ОЦЕНКА ПЛОЩАДЕЙ ПОЖАРОВ И ЭМИССИЙ УГЛЕРОДА ПО ДАННЫМ РАЗЛИЧНЫХ АВТОРОВ  
ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

Период	Площадь пожа- ров, млн. га		Эмиссии углеро- да, Тг С год <sup>-1</sup>	Ссылка на источник	Примечания
	всего	в лесах			
1960-2000	4.1	2.79	62.5	Schultz et al., 2008	Площадь гарей варьирует от 1.13 до 15.0 млн. га в год, эмиссии – 16-292 Тг С
1971-1991	12.1		194	Conard, Ivanova, 1997	
1998	13.3		135-190	Conard et al., 2002	
1998	13.1		290-383	Kasischke, Bruhwiler, 2003	Пределы оценок даны для разных допущений
1998	10.1		185.5	Kajji et al., 2002	
1998-2002	7-11		116-520	Soja et al., 2004	Пределы оценок даны для разных допущений
2000	22.4			Tansey et al. 2004	
2000-2003			85-210	Kasischke et al., 2005	Оценка для Сибири
2001	5.155	3.851	39.3-55.4 <sup>a</sup>	Zhang et al., 2003	
2003-2007		3.875 <sup>b</sup>	44.3 (13.9-127.1)	Ершов и др., 2009	
2000-2007		1.4	12.0 <sup>c</sup>	Заварзин, 2007	Данные для управляемых земель лесного фонда
2000-2008	19.7	6.8		Vivchar 2011	Леса с полнотой $\geq 0.6$

*a, b, c только в лесах*

Средний состав продуктов горения за оцениваемый период составил: С-СО<sub>2</sub> 84.6% (от общего количества углерода в сгоревших материалах), С-СО — 8.2%, С-СН<sub>4</sub> — 1.1%, С-НМНС (неметановые углеводороды) — 1.2%, органический углерод — 1.2% и элементный углерод (black carbon) — 0.1%. Твердые частицы составили 3.5%, из которых РМ<sub>2.5</sub> 1.2%. Самое высокое содержания СН<sub>4</sub> и СО в продуктах горения отмечено в экосистемах с наличием торфа.

Приведенные данные относятся к прямым пожарным эмиссиям. Существенные послепожарные эмиссии наблюдаются в лесах вследствие гибели значительного количества деревьев, особенно после верховых и торфяных пожаров, а также устойчивых низовых пожаров на вечной мерзлоте. Наши оценки показывают, что в среднем для всех видов лесных пожаров послепожарный отпад составляет около трети запаса древесины до пожара, а годовые эмиссии вследствие разложения накопленной мертвой древесины составляют величину, несколько превышающую размер прямых эмиссий. В итоге, растительные пожары последнего десятилетия являлись источником углеродных эмиссий порядка 250 Тг С год<sup>-1</sup>, что составляет около 50% промышленных углеродных эмиссий страны.

Различные авторы публиковали различные оценки, как по площадям пожаров, так и по эмиссиям (таблица 3). Как правило, оценка погрешностей либо не приводилась, либо указывался некий диапазон возможных результатов в зависимости от принятых предположений. В принципе, оценка неопределенности полученных результатов требует учета нечеткого (fuzzy) характера рассматриваемой задачи. Используя методы, описанные в

[Shvidenko et al., 2010], мы оценили погрешности в оценке годовой площади пожаров  $\pm 9\%$ , а прямых углеродных эмиссий  $\pm 23\%$  (доверительный интервал 0.9). В среднем за рассматриваемый период, наш результат достаточно близок к данным глобальной базы пожарных эмиссий (GFED3) [Van Der Werf et al., 2010], которая оценила среднюю площадь пожаров на территории России в 9.17 x 106 га год<sup>-1</sup> (+11.5% к нашей оценке), а эмиссии 137 Тг С год<sup>-1</sup> (+13.2%). Следует учесть, что в глобальной базе площади определены на основе различных спутниковых датчиков, а эмиссии — по модели CASA [Van Der Werf et al., 2010] в отличие от последовательно эмпирического подхода, реализованного в этом сообщении. С высокой вероятностью можно утверждать, что средняя величина прямых пожарных эмиссий углерода на территории России в течение последнего десятилетия составила 120-140 миллионов тонн в год.

Средние годовые величины основных видов азотных эмиссий составили 899 Мг год<sup>-1</sup> для NO<sub>x</sub> (из них 58% от пожаров в лесах и 30% — на болотах), 67 Мг год<sup>-1</sup> для N<sub>2</sub>O (соответственно 60% от лесных пожаров и 27% — на болотах) и 406 Мг год<sup>-1</sup> для NH<sub>3</sub> (61% и 26%, соответственно).

Современные модельные представления о будущих пожарных режимах в бореальной зоне предполагают удвоение числа пожаров к концу нынешнего века, возрастание количества катастрофических пожаров и пожаров, охватывающих большие территории и выходящих из-под контроля, существенное увеличение интенсивности пожаров, возрастание количества и изменения газового состава пожарных эмиссий вследствие усиления почвенного горения (напр. [Flannigan et al., 2009]).

Все четче проявляется связь между катастрофическими пожарами и масштабными климатическими аномалиями (2003 год — пожары на российском Дальнем Востоке и наводнение в Китае, 2010 год — пожары в Европейской части России и наводнения в Пакистане и Индии). Весьма вероятно, значительное увеличение отпада в бореальных лесах, таяние вечной мерзлоты и последующая аридизация ландшафтов на многолетней мерзлоте будут вести к повышенному отпаду деревьев в лесах, деградации и гибели хвойных лесов, а также к широкому распространению «зеленого опустынивания» [Efremov, Shvidenko, 2004]. Процессы необратимого замещения леса иными типами растительности уже отмечены в ряде южных экотонных лесной зоны [Буряк и др., 2009; Евдокименко, 2009].

Для территории России и вечномерзлотных территорий особо высока вероятность существенной обратной связи между потеплением и эскалацией пожарных режимов: увеличение концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере приводит к увеличению длительных и сухих периодов, которые способствуют росту площади и интенсивности пожаров и существенному увеличению эмиссий парниковых газов. В свою очередь, рост углеродных эмиссий ведет к дестабилизации климатической системы, что провоцирует усиление угрозы пожаров.

Природные, особенно лесные пожары уже стали проблемой высшего приоритета ряда стран. Сегодня лесоохранные службы развитых стран северного полушария балансируют в узком диа-

пазоне между удовлетворительной охраной лесов от пожаров и крупными потерями в годы высокой пожарной опасности. Пожары 2010 года в Европейской части России четко продемонстрировали те угрозы, которые создают растительные пожары в условиях меняющегося климата. Для территории страны, леса которой на 90% представленной бореальными лесами высокой пожарной опасности, следует ожидать непропорционально большую эскалацию пожарных режимов в сравнении с усилением климатической пожарной опасности. Поэтому коренное усовершенствование системы охраны лесов от пожаров является неотложной государственной задачей сегодняшнего дня. Эта комплексная проблема включает (1) системный анализ нынешних и будущих региональных пожарных режимов и требований к рациональной системе охраны лесов от пожаров; (2) разработку новой доктрины охраны лесов от пожаров; (3) разработку и внедрение стратегии предотвращения широко-масштабных нарушений в лесах, в т.ч. адаптацию структуры лесных ландшафтов к будущему климату; (4) внедрение эффективной системы лесного мониторинга; (5) выделение необходимых ресурсов; (6) разработку нового/ усовершенствование существующего законодательства и институциональных структур лесоправления, ориентированных на вызовы меняющегося климата; (7) целесообразную международную кооперацию. В настоящее время эффективная реализация всех перечисленных выше задач остается делом будущего.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буряк Л. В., Сухинин А. И., Москальченко С. А. Влияние пожаров на лесовозобновление в условиях Нижнего Приангарья // Лесоведение. 2009. № 5. С. 17-23.
2. Вивчар А. В., Моисеенко К. Б., Панкратова Н. В. 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. 2010. № 46 (3). С. 307-320.
3. Евдокименко М. Д. Пирогенная дигрессия лиственничников Забайкалья и Северной Монголии // ИВУЗ Лесной журнал. 2009. № 4. С. 12-18.
4. Ершов Д.В., Ковганко К.А., Соколова Е.Н. ГИС-технология оценки пирогенных эмиссий углерода по данным Terra-MODIS и государственного учета лесов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Сборник научных статей. Вып. 6. Т. II. М.: ООО «Азбука-2000», 2009. С. 365-372.
5. Заварзин Г.А. (ред.) Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России, Наука, МЖ: 2007, 315 с.
6. Росгидромет РФ. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2010 год. М.: Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. 2011. 66 с.
7. Росстат РФ. Регионы России. Социально-экономические показатели 2010. Статистический сборник. М.: Федеральная служба государственной статистики. 2010. 1000 с.

Прим. Работа выполнена в Международном институте прикладного системного анализа (International Institute for Applied Systems Analysis, Schlossplatz, 1, A-2361, Laxenburg, Austria) и Институте леса им. В.Н. Сукачева СО РАН (660036, Красноярск, Академгородок).

8. Рубцов А.В., Сухинин А.И., Ваганов Е.А. Классификация территории Сибири по фактической горимости с использованием спутниковых данных // Журнал сибирского федерального университета. Биология. 2010. № 1. С. 30-39.
9. Andreae M. O., Merlet P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning // *Global Biogeochemical Cycles*. 2001. № 15. С. 955-966.
10. Conard S.G., Ivanova G.A. Wildfire in Russian boreal forests—potential impacts of fire regime characteristics on emissions and global carbon balance estimates *Environmental Pollution*, 1997, 98(3). pp. 305–313.
11. Conard S.G., Sukhinin A.I., Stocks B.J. et al. Determining effects of area burned and fire severity on carbon cycling and emissions in Siberia *Climatic Change*, 2002. V.55(1-2). Pp. 197–211.
12. D'Andrea M., Fiorucci P., Holmes T. P. A stochastic Forest Fire Model for future land cover scenarios assessment // *Natural Hazards and Earth System Science*. 2010. № 10. С. 2161-2167.
13. Efremov D. F., Shvidenko A. Z. Long-term environment al impact of catastrophic forest fires in Russia's Far East and their contribution to global processes // *International Forest Fire News* 2004. № 32. С. 43-49.
14. Flannigan M.D., Stocks B.J., Turetsky M.R., Wotton, B.M. Impact of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest // *Global Change Biology*. 2009. № 15. С. 549-560.
15. Kajii, Y., Kato, S., Streets, D.G., Tsai, N.Y., Shvidenko, A., Nilsson, S., McCallum, I., Minko, N.P., Abushenko, N., Altyntsev, D. & Khodzer, T.V., 2002. Boreal forest fires in Siberia in 1998: Estimation of area burned and emissions of pollutants by advanced very high resolution radiometer satellite data. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 107.
16. Kasischke E.S., Bruhwiler L.P. Emissions of carbon dioxide, carbon monoxide, and methane from boreal forest fires in 1998. *Journal of Geophysical Research*, 2003. 107, 8146, doi:10.1029/2001JD000461.
17. 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*, 19, 1-16.
18. Lapenis A., Shvidenko A., Shepaschenko D., Aiyyer A. Acclimation of Russian forests to recent changes in climate // *Global Change Biology*. 2005. № 11. С. 2090-2102.
19. Schepaschenko D., McCallum I., Shvidenko A., et al. A new hybrid land cover dataset for Russia: a methodology for integrating statistics, remote sensing and in situ information // *Journal of Land Use Science*. 2010. № 6(4).
20. Schultz M.G., Heil A., Hoelzemann J.J. et al. Global wildland fire emissions from 1960 to 2000, *Global Biogeochemical cycles*, 2008. Vol. 22, GB2002, doi:10.1029/2007GB003031.
21. Seiler W., Crutzen P. J. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning // *Climatic Change*. 1980. № 2. С. 207-247.
22. Shvidenko A., Schepaschenko D., McCallum I., Nilsson S. Can the uncertainty of full carbon accounting of forest ecosystems be made acceptable to policymakers? // *Climatic Change*. 2010. № 103. С. 137-157.
23. Soja A. J., Cofer W. R., Shugart H. H., et al. Estimating fire emissions and disparities in boreal Siberia (1998-2002) // *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*. 2004. № 109. D14S06.
24. Tansey K., Gregoire J.-M., Stroppiana D., et al. Vegetation burning in the year 2000: Global burned area estimates from SPOT VEGETATION data // *Journal of Geophysical Research*. 2004. 109, D14503. doi:10.1029/2003JD003598.
25. 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) // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2010. № 10. С. 11707-11735.
26. Vivchar A. Wildfires in Russia in 2000-2008: estimates of burnt areas using the satellite MODIS MCD45 data // *Remote Sensing letters*. 2011. № 2(1). С. 81-90.
27. Zhang Y.-H. Monthly burned area and forest fire carbon emission estimates for the Russian Federation from SPOT VGT / Y.-H. Zhang et al. // *Remote Sensing of Environment*. 2003. - Vol. 87. – P. 1-15.