

DOI 10.31509/2658-607x-202254-117
УДК 630.43

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ОЦЕНКИ ПРЯМЫХ ПИРОГЕННЫХ ЭМИССИЙ УГЛЕРОДА В ЛЕСАХ РОССИИ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА 2021 ГОДА

© 2022 г.

Д. В. Ершов*, Е. Н. Сочилова

Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН,
Россия, 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32

* E-mail: dvershov67@gmail.com

Поступила в редакцию: 28.11.2022

После рецензирования: 15.12.2022

Принята к печати: 18.12.2022

В статье приводится статистика количества углерода, эмитированного в атмосферу в различных соединениях в результате крупных пожаров 2021 г. в лесах России с использованием данных дистанционного мониторинга. В 2021 г. площадь повреждений лесов от пожаров составила 9.3 млн. га, а размеры выбросов углерода — 66.4 Мт С, что выше среднегодовых значений почти в два раза. Сравнительный анализ площадей лесных пожаров и прямых эмиссий углерода 2021 г. с временной серией этих показателей за последние двадцать лет позволил сделать вывод о том, что этот год является аномальным относительно всего временного ряда, аналогично пожароопасным сезонам 2003 и 2012 гг. Период повторяемости трех аномальных пожарных сезонов составляет девять лет. Причина повторяемости не установлена. При этом пройденные пожарами площади лесов и размеры выбросов углерода и других парниковых газов в аномальные годы снижается со 127.2 Мт С (3.7 раза) в 2003 г., 83.8 Мт С (2.4 раза) в 2012 г. до 66.4 Мт С (1.9 раза) в 2021 г.

Ключевые слова: лесные пожары, пирогенные эмиссии, углерод, дистанционный мониторинг, лесные горючие материалы

Задача оценки и мониторинга ежегодных прямых выбросов парниковых газов от природных пожаров с помощью данных дистанционного зондирования из космоса решается многими научными коллективами России. Результаты и базы данных с долгосрочными оценками прямых пирогенных эмиссий углерода в XXI в. опубли-

кованы в ряде работ, в частности в работах А. З. Швиденко и Д. Г. Щепашенко (Shvidenko, Schepaschenko, 2013), В. И. Харука с соавторами (Kharuk et al., 2021), Е. И. Пономарева с соавторами (Ponomarev et al., 2021). А. З. Швиденко и Д. Г. Щепашенко определили, что за период с 1998 по 2010 г. на территории России в среднем ежегодные

значения прямых выбросов от природных пожаров составили 121 ± 28 Мт С, из которых 92 ± 18 Мт С (2/3 всех выбросов) были связаны с пожарами на покрытых лесом землях. В. И. Харук с соавторами (2021) представили оценку площадей повреждений в результате природных пожаров для Центральной Сибири за период с 1999 по 2019 г. по данным дистанционного зондирования. Авторы констатируют, что 30% всех обнаруженных по спутниковым данным природных пожаров Центральной Сибири встречаются на покрытых лесом землях. Среднеголетние размеры прямых пирогенных эмиссий углерода от природных пожаров в XXI в. в Сибири по их оценкам составляют 85 ± 20 Мт С /год.

Е. И. Пономарев с соавторами (Ponomarev et al., 2021) дают еще большие размеры выбросов от пожаров для Центральной Сибири за интервал 2002–2020 гг. По их данным, в первом десятилетии XXI в. средний размер пирогенных выбросов углерода составил 80 ± 20 Мт С/год, а во втором десятилетии — 110 ± 20 Мт С/год. При этом авторы отмечают, что в аномальные пожароопасные сезоны 2003, 2012 и 2019 гг. размеры прямых эмиссий углерода от природных пожаров составляли более 150 Мт С/год, 220 Мт С/год и 180 Мт С/год соответственно.

Каждый коллектив применял свои методики расчета запасов лесных горючих материалов до пожара, модели определения типа и интенсивности пожара и методы оценки размеров прямых пиро-

генных эмиссий. Например, Е. И. Пономарев с соавторами (Ponomarev et al., 2021) использовали в своих моделях значения мощности излучения пожара (fire radiative power) для каждого пикселя изображения MODIS при расчете площадей природных пожаров разной степени интенсивности (низкая, средняя и высокая). Пройденные огнем земли пространственно привязывались к тематическим классам карты растительности (BEGA-PRO, 2022) и на основе генерализованных данных о запасах лесных горючих материалов (ЛГМ) из литературных источников и данных наземных измерений определялись суммарные запасы допожарных ЛГМ (в диапазоне от 13.8 до 54.0 т/га) для разных типов древесной растительности. С помощью эмпирических оценок, опять же собранных из научных публикаций, авторы сформировали диапазоны конверсионных коэффициентов и объемов сгораемых ЛГМ при пожарах разной интенсивности. Так, авторы приводят следующие диапазоны расхода запасов фитомассы основных проводников горения лесных горючих материалов для природных пожаров низкой, средней и высокой интенсивности: 1.1–9.7 т/га, 8.6–21.5 т/га и 22.5–53.6 т/га соответственно. Далее эти диапазоны используются для количественных оценок прямых выбросов углерода от пожаров в Сибири.

Цель представленного в статье исследования — дать оценку прямых пирогенных эмиссий углерода за 2021 год на основе разработанной и апробированной мето-

дики (Ершов и др., 2009), а также провести анализ и сравнение полученных оценок с многолетними данными наблюдений за лесными пожарами и размерами прямых пирогенных выбросов углерода и других парниковых газов спутникового мониторинга (2002–2020 гг.).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использованная в нашей работе методика оценки размеров ежегодных прямых пирогенных выбросов углерода, углекислого и других парниковых газов в атмосферу для лесов России на национальном уровне базируется на пиксельной оценке пространственно распределенных данных (растровых картах) о пожарах и допожарных запасах лесных горючих материалов низкого пространственного разрешения MODIS (230 м). Для каждого пикселя с тематическим классом лесного покрова карты растительности наземных экосистем (Барталев и др., 2016) рассчитаны запасы ЛГМ верхнего полога, подроста и подлеска, живого напочвенного покрова и лесной подстилки (т/га) по методике (Соколова и др., 2009). Созданные цифровые растровые слои составляют основу пространственной базы допожарных лесных горючих материалов. Приведенные в таблице 1 диапазоны минимальных и максимальных запасов ЛГМ для лесных классов карты растительности показывают сопоставимые значения, приведенные в статье Е. И. Пономарева с соавторами (2021)

и в статьях других авторов (Вонский, 1957; Курбатский, 1970; Шешуков, 1970; Цветков, 2001; Федоров, Цыкалов, 2002; Фуряев и др., 2007; Матвеева, 2008; Фуряев и др., 2009; Ковалева и др., 2017). Некоторые занижения средних значений запасов фитомассы проводников горения вероятно связаны с тем, что в расчетах использовались данные учета лесного фонда 2006 г. и соответствующие для них конверсионные коэффициенты (Замолотчиков и др., 2003), а также база данных по фитомассе и продуктивности лесов на пробных площадках, собранная по материалам публикаций (Уткин и др., 1994). Возможно, требуется актуализация баз данных расчетов и совершенствование методов расчета. Кроме того, в расчет запасов фитомассы лесных горючих материалов не входят данные для валежа и других крупных древесных остатков, что также могло повлиять на суммарные значения запасов проводников горения. В следующих работах будут сделаны значительные изменения в расчетах запасов фитомассы ЛГМ на основе ряда моделей, опубликованных авторами для следующих слоев: (1) фитомасса деревьев (Schepaschenko et al., 2018); (2) нижние ярусы — подрост и подлесок и (3) живой напочвенный покров (Швиденко и др., 2008); (4) крупные древесные остатки (Швиденко и др., 2009) и (5) лесная подстилка (Щепашенко и др., 2013).

Размеры пирогенных эмиссий углерода в лесах определяются на основе данных о допожарных запасах основных проводни-

ков горения лесных горючих материалов, типе и интенсивности пожара (Ершов и др., 2016) и соответствующих расходах и объемах углерода и парниковых газов. Пространственные данные о природных пожарах ежегодно формируются и поступают из ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019).

Для определения типа и интенсивности лесного пожара используются тематический растровый продукт с характеристикой категории состояния древостоя,

поврежденного огнем в результате пожара (Стыценко и др., 2013), и лесные классы карты растительности наземных экосистем (Барталев и др., 2016). В зависимости от степени повреждения хвойных или лиственных лесов в каждом пикселе карты растительности определяется тип пожара (верховой или низовой), а также степень интенсивности низового пожара. Полученный производный растровый продукт типа и интенсивности пожара использу-

Таблица 1. Диапазоны значений запасов фитомассы основных проводников горения лесных горючих материалов по типам растительности карты наземных экосистем (Барталев и др., 2016)

№	Тип лесного покрова	верхний полог, т/га		подрост, подросток, т/га		живой напочвенный покров, т/га		лесная подстилка, т/га	
		среднее	ско	среднее	ско	среднее	ско	среднее	ско
		мин-макс		мин-макс		мин-макс		мин-макс	
1	Темнохвойные вечнозеленые леса	12.60	±3.80	3.66	±0.74	4.55	±1.28	20.94	±6.79
		4.36–48.95		0.18–7.61		0.10–10.45		4.20–31.40	
2	Светлохвойные вечнозеленые леса	8.77	±3.77	1.45	±0.28	5.16	±1.75	20.06	±12.2
		2.73–31.79		0.39–5.91		0.05–34.60		4.20–48.40	
3	Лиственные леса	8.01	±3.00	2.85	±1.20	4.35	±1.51	9.54	±6.74
		0.39–34.75		1.23–5.83		0.05–10.42		1.40–39.60	
4	Лиственничные леса (в т. ч. редкие насаждения)	4.11	±1.63	1.78	±0.20	4.38	±0.70	15.40	±4.13
		1.05–12.80		0.99–2.80		0.23–9.39		11.00–33.00	
5	Смешанные леса с преобладанием хвойных пород	9.96	±3.11	2.31	±0.54	4.47	±1.50	10.68	±4.55
		0.85–33.99		0.94–5.52		0.05–23.55		5.22–22.76	
6	Смешанные леса с одинаковым участием хвойных и лиственных пород	10.62	±3.06	2.24	±0.56	4.31	±1.41	12.60	±4.94
		0.95–33.65		1.01–5.16		0.05–20.77		7.60–24.70	
7	Смешанные леса с преобладанием лиственных пород	8.31	±2.40	2.30	±0.56	4.11	±1.50	10.00	±3.75
		0.39–12.80		1.09–4.81		0.05–18.0		6.30–21.20	

ется для определения доли расхода запасов проводников горения верхнего полога, подроста и подлеска, живого напочвенного покрова и лесной подстилки. На завершающем этапе запасы фитомассы всех слоев вертикального профиля ЛГМ объединяются в общий показатель и с уменьшением в два раза переводятся в значения прямых пирогенных эмиссий углерода в атмосферу. Для получения оценок парниковых газов используются конверсионные коэффициенты, опубликованные в статье Д. Г. Замолодчикова с соавторами (Замолодчиков и др., 2005).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате применения методики расчета пирогенных эмиссий углерода от лесных пожаров мы определили диапазоны (относительно средних значений) расходов фитомассы ЛГМ для разных типов пожара и его интенсивности для пожароопасного сезона 2021 г. Полученные оценки расходов запасов фитомассы в результате низовых пожаров низкой, средней и высокой интенсивности, а также верховых пожаров для покрытой лесом территории России 2021 г. находятся в диапазонах: 0.05–5.46 т/га (в среднем 1.62 ± 0.55 т/га), 1.4–25.33 т/га (в среднем 9.51 ± 1.97 т/га), 0.3–43.25 т/га (в среднем 14.37 ± 4.79 т/га) и 12.20–66.32 т/га (в среднем 24.62 ± 2.35 т/га) соответственно. Приведенные оценки средних значений расходов фитомассы основных проводников горения ЛГМ несколько за-

нижены по сравнению с литературными источниками, приведенными в вводной части статьи, как отмечалось выше из-за недооценки допожарных запасов основных проводников горения ЛГМ. Величину этой недооценки еще предстоит нам выяснить с помощью наземных данных о запасах фитомассы в лесах и других наземных экосистемах, полученных при поддержке гранта на проведение научных исследований в рамках создания национальной системы мониторинга климатически активных веществ (Распоряжение..., 2022).

Результаты размеров пожарных эмиссий за многолетний период наблюдений (2002–2021 гг.) были представлены авторами статьи на конференции «Научные основы устойчивого управления лесами» (Ершов и др., 2022). В соответствии с данными спутникового мониторинга (2002–2021 гг.) суммарная площадь поврежденных пожарами лесов за 20 лет составила 100.3 млн га, а размеры прямых пожарных эмиссий углерода — 725.5 Мт С (табл. 2). За период 2002–2020 гг. средняя площадь повреждений лесов пожарами в год по нашим оценкам равна $4.79 (\pm 3.05)$ млн га С/год, размеры прямых пирогенных выбросов углерода — $34.69 (\pm 28.27)$ Мт С/год.

В предпоследней строке таблицы 2 приводится разница между значениями площадей повреждений пожарами лесов, прямых пирогенных эмиссий углерода и парниковых газов 2021 г. и среднеголетних значений этих же показателей, полученных за период 2002–2020 гг.

Таблица 1. Диапазоны значений запасов фитомассы основных проводников горения лесных горючих материалов по типам растительности карты наземных экосистем (Барталев и др., 2016)

Год	Эмиссии углерода, т С	Пройденная лесными пожарами площадь, га	Удельные эмиссии С, т/га	Эмиссии парниковых газов, т				
				CO ₂	CO	CH ₄	N ₂ O	NO _x
1	2	3	4	5	6	7	8	9
2002	21 692 800	4 671 712	4.64	79 540 267	3 036 992	347 085	2386	86 244
2003	127 116 214	12 025 093	10.57	466 092 785	17 796 270	2 033 859	13 983	505 378
2004	13 941 921	1 224 070	11.39	51 120 377	1 951 869	223 071	1534	55 429
2005	20 990 370	1 328 394	15.8	76 964 690	2 938 652	335 846	2309	83 452
2006	22 158 988	3 657 062	6.06	81 249 623	3 102 258	354 544	2437	88 098
2007	2 831 700	974 423	2.91	10 382 900	396 438	45 307	311	11 258
2008	26 560 308	6 832 945	3.89	97 387 796	3 718 443	424 965	2922	105 596
2009	12 046 092	2 739 083	4.4	44 169 004	1 686 453	192 737	1325	47 892
2010	15 321 461	2 107 599	7.27	56 178 690	2 145 005	245 143	1685	60 914
2011	26 770 414	3 850 295	6.95	98 158 185	3 747 858	428 327	2945	106 432
2012	83 821 145	11 365 539	7.38	307 344 198	11 734 960	1 341 138	9220	333 249
2013	28 093 793	3 420 556	8.21	103 010 574	3 933 131	449 501	3090	111 693
2014	35 882 796	4 441 315	8.08	131 570 251	5 023 591	574 125	3947	142 660
2015	20 413 097	3 691 087	5.53	74 848 024	2 857 834	326 610	2245	81 157
2016	37 188 902	6 341 329	5.86	136 359 307	5 206 446	595 022	4091	147 852
2017	40 089 468	3 334 361	12.02	146 994 716	5 612 526	641 431	4410	159 384
2018	43 339 633	6 622 768	6.54	158 911 988	6 067 549	693 434	4767	172 306
2019	44 213 928	5 904 418	7.49	162 117 736	6 189 950	707 423	4864	175 782
2020	36 603 092	6 465 819	5.66	134 211 337	5 124 433	585 649	4026	145 523
Всего 2002–2020 гг.	659 076 122	90 997 868	7.24	2 416 612 448	92 270 657	10 545 218	72 497	2 620 300
Среднее многолетнее значение	34 688 216.95	4 789 361.5	7.4	127 190 128.8	4 856 350.4	555 011.5	3815.6	137 910.5
Стандартное отклонение	28 270 109.0	3 052 654.9	3.2	103 657 066.2	3 957 815.2	452 321.6	3109.8	112 393.9
2021	66 441 800	9 298 508	7.15	243 619 933	9 301 852	1 063 069	7309	264 154
Относительно среднего многолетнего значения	+31 753 583.1	+4 509 146.5	-0.25	+116 429 804.5	+4 445 501.6	+508 057.3	+3493.0	+126 243.1
Всего 2002–2021 гг.	725 517 922	100 296 376	7.23	2 660 232 381	101 572 509	11 608 287	79 806	2 884 453

Все показатели, за исключением удельных эмиссий углерода (колонка 4), превышают среднемноголетние значения, при этом порядок чисел соизмерим со среднемноголетними оценками. Эмиссии углерода и других парниковых газов в 2021 г. превысили среднемноголетние значения в 1.9 раза аналогично 2003 г. (превышение в 3.7 раза) и 2012 г. (в 2.4 раза). Таким образом, 2021 г. приравнивается к аномальному году по масштабам прямых выбросов углерода от пожаров, аналогично пожароопасным сезонам 2012 и 2003 гг. (рис. 1).

На графике (рис. 1) выделяются три аномальных года, превышающие суммарные значения пирогенных эмиссий углерода относительно среднемноголетнего показателя соответственно на 92.4, 49.1 и 31.8 Мт С. Временной интервал между этими годами составляет 9 лет. В нашей статье (Ершов, Соколова, 2020) мы отмечали, что при анализе временного ряда с 2002 по 2020 гг. были обнаружены два аномальных года, временная разница между которыми составляет 9 лет. Мы предположили, что, возможно, 2021 г. станет также аномаль-

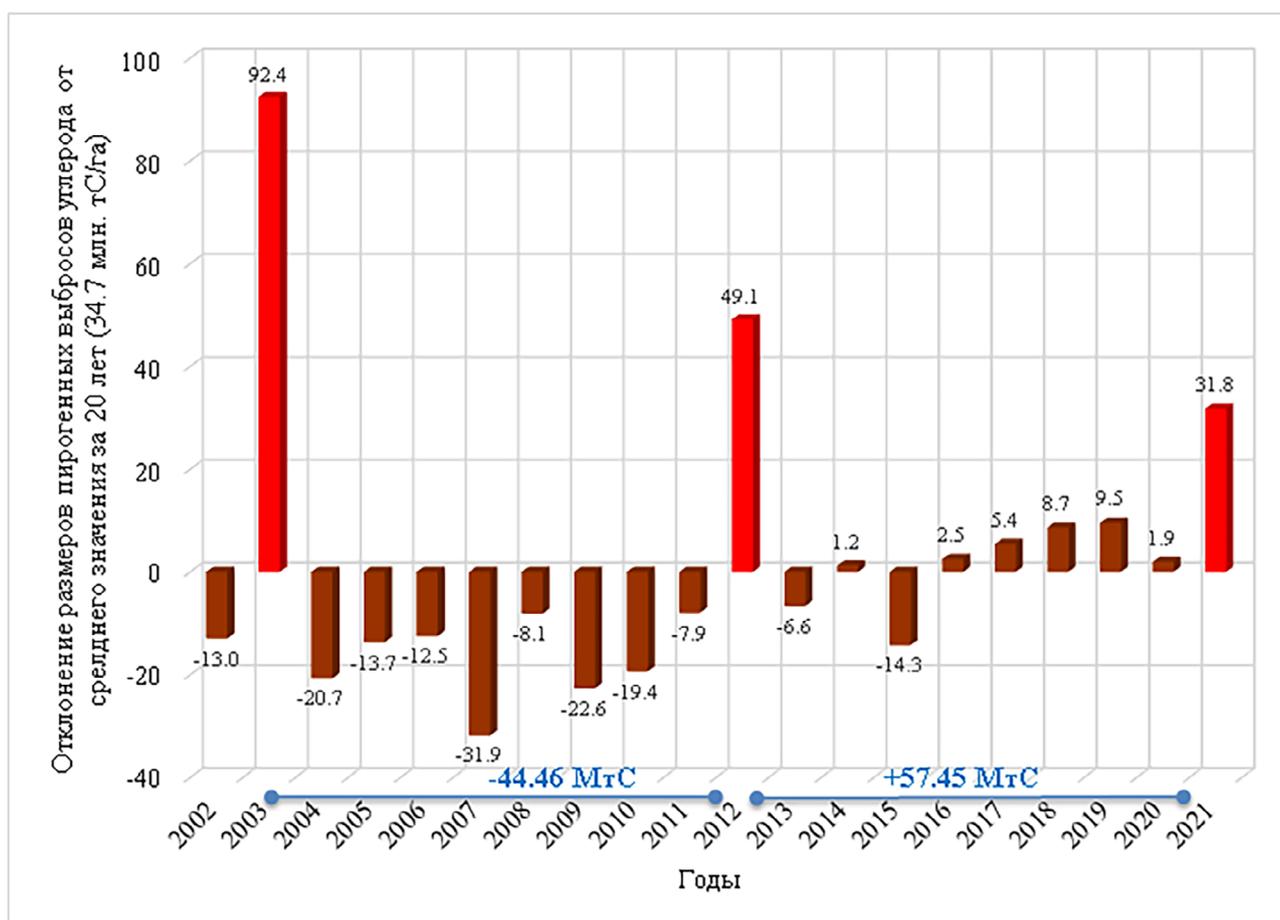


Рисунок 1. Отклонение значений прямых пирогенных эмиссии углерода относительно среднемноголетнего значения за период с 2002 по 2020 гг. Синими линиями обозначены интервалы между аномальными годами с шагом в 9 лет, а цифрами обозначен размер и знак эмиссий углерода относительно среднемноголетнего значения за 19 лет

ным, если выявленная цикличность существует на территории России. Причина такой повторяемости для России на данный момент нами не установлена и требует дополнительного исследования. Можно только констатировать тот факт, что размеры прямых пироженных эмиссий в аномальные годы снижаются в течение 20 лет с 127.1 Мт С (2003 г.), 83.8 Мт С (2012 г.) до 66.4 Мт С в 2021 г. Предположительно, это связано с тем, что с 2016 по 2020 гг. наблюдается систематическое превышение пироженных выбросов углерода относительно среднеемноголетнего значения, а суммарное значение превышений выбросов за 2012–2020 гг. имеет положительный знак, т. е. 57.45 Мт С (рис. 1). Таким образом, интенсивность пожаров из года в год возрастает, соответственно ежегодный расход ЛГМ в лесных экосистемах увеличивается, что приводит к снижению количества выбросов в аномальные годы. Однако это предположение требует дополнительных проверок полученных модельных расчетов на основе наземных данных поврежденных пожарами лесов, которые будут также собираться при поддержке гранта на проведение научных исследований в рамках создания национальной системы мониторинга климатически активных веществ (Распоряжение..., 2022).

Предположительно 2022 г. будет обычным пожароопасным сезоном в России, не превышающим размеры площадей

лесных пожаров и прямых выбросов углерода от них по отношению к среднеемноголетним показателям.

Рассматривая в пространстве распределения выбросов углерода от пожаров в 2021 г. на территории России (рис. 2), можно отметить, что основной вклад вносят традиционно регионы Урала (Ханты-Мансийский и Ямало-Ненецкий автономные округа), Сибири (Томская область, Красноярский край, Иркутская область) и Дальнего Востока (Республика Саха (Якутия), Забайкальский край и Амурская область). Отмечается также рост горимости и эмиссий углерода в северных широтах европейской части лесов России по сравнению с 2020 г. (Ершов, Соколова, 2022).

Рисунок 3 показывает отклонение размеров удельных пироженных эмиссий углерода 2021 года относительно среднеемноголетних значений. В 2021 г. (как и в 2020 г.) превышение эмиссии углерода относительно среднеемноголетних значений наблюдаются в лесах республики Якутия, на большей части Магаданской области и Чукотского автономного округа, на севере Хабаровского края. Также эмиссии 2021 г. превышают среднеемноголетние значения на лесных землях в приволжском и северо-западном регионах. В европейской и южной частях России превышения значений эмиссий углерода над среднеемноголетними показателями носят локальный и фрагментарный характер.

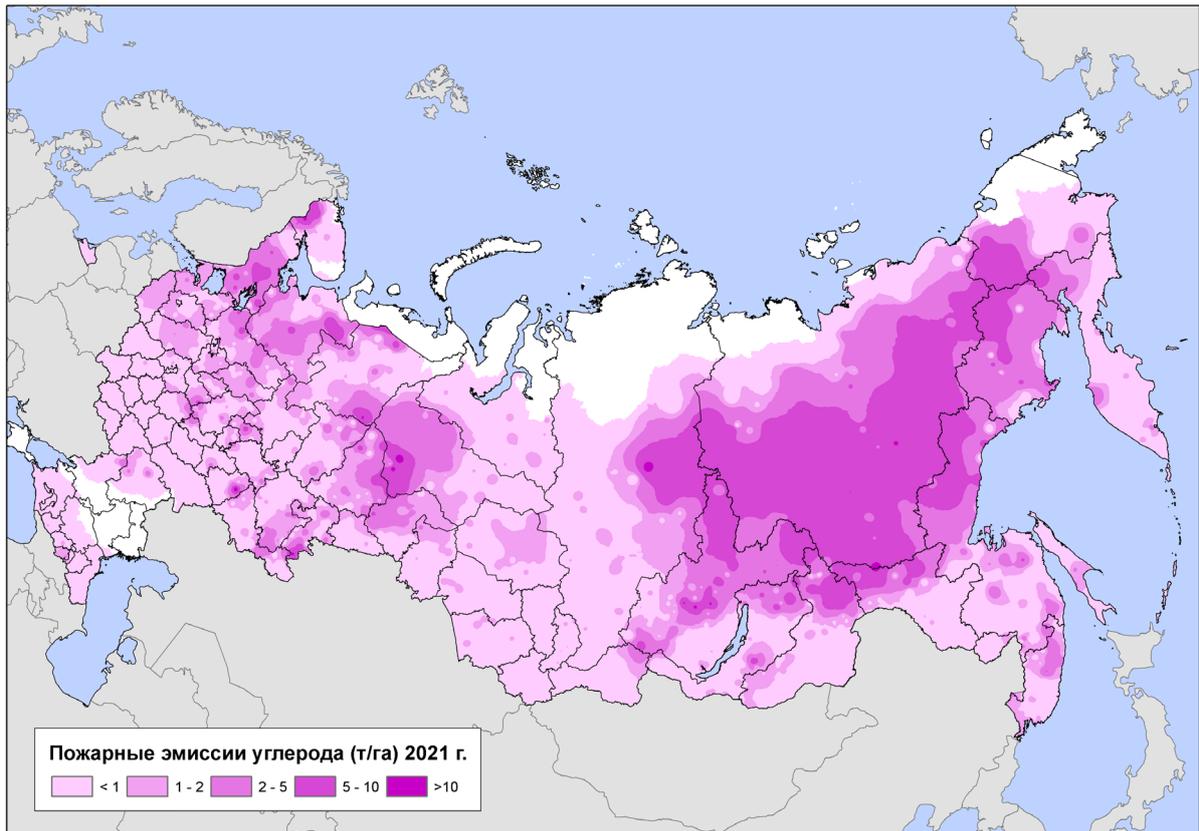


Рисунок 2. Карта распределения прямых удельных выбросов углерода (т/га) от пожаров 2021 г. в лесах России



Рисунок 3. Карта отклонений прямых пирогенных эмиссий углерода в 2021 г. от среднееголетних значений

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ежегодные размеры прямых пирогенных выбросов углерода и других парниковых газов от лесных пожаров в России в 2021 г. оценивались по методике ЦЭПЛ РАН. Проведенные расчеты расходов запасов фитомассы лесных горючих материалов для разных типов пожаров и их интенсивности показали заниженные оценки относительно других публикаций, что связано с недооценкой допожарных запасов основных проводников горения в лесах России. Планируется значительно модернизировать методику расчета за счет использования более современных моделей оценки фитомассы слоев лесных горючих материалов и новых наборов спутниковых тематических продуктов среднего пространственного разрешения (230 м).

По результатам применения текущей методики, в 2021 г. площадь поврежденных лесов от пожаров составила 9.3 млн га, размеры прямых выбросов углерода от которых оцениваются на уровне 66.4 Мт С. Наши предположения о том, что 2021 год станет аномальным по горимости и размерам выбросов парниковых газов от лесных пожаров, подтвердились. Обнаружена повторяемость аномальных пожароопасных сезонов с шагом в девять лет за последние 20 лет мониторинга. Для выявления причины и установления связи этой повторяемости требуются дополнительные исследования. Важно отметить, что размеры выбросов в аномальные годы систематически снижаются, что, вероятно, связа-

но с ростом количества крупных пожаров высокой интенсивности в лесах и повышенным расходом лесных горючих материалов в обычные пожароопасные сезоны.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Статистическая оценка размеров пирогенных эмиссий углерода выполнена в рамках государственного задания ЦЭПЛ РАН АААА-А18-118052590019-7, создание и анализ спутниковых продуктов и геоинформационных карт выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-77-30015).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В.* Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
- ВЕГА-PRO: спутниковый сервис анализа вегетации. ИКИ РАН, 2022. URL: <http://pro-vega.ru>. (дата обращения 29.11.2022).
- Вонский С. М.* Интенсивность огня низовых лесных пожаров и ее практическое значение. Л.: ЛенНИИЛХ, 1957. 52 с.
- Ершов Д. В., Барталев С. А., Исаев А. С., Соколова Е. Н., Стыценок Ф. В.* Метод оценки пожарных эмиссий парниковых газов с использованием спутниковых данных: результаты применения для

лесов России в 21 веке // Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении, лесном хозяйстве и экологии: Доклады VI Всероссийской конференции. (Москва, 20–22 апреля 2016 г.). М.: ЦЭПЛ РАН, 2016. С. 12–17.

Ершов Д. В., Ковганко К. А., Сочилова Е. Н. ГИС-технология оценки пирогенных эмиссий углерода по данным Terra-MODIS и государственного учета лесов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 6. № 2. С. 365–372.

Ершов Д. В., Сочилова Е. Н. Двадцатилетняя динамика прямых пирогенных эмиссий углерода в лесах России в 21 веке по данным дистанционного мониторинга // Научные основы устойчивого управления лесами. Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 30-летию ЦЭПЛ РАН (Москва, 21–25 апреля 2022 г.) М.: ЦЭПЛ РАН, 2022. С. 267–269.

Ершов Д. В., Сочилова Е. Н. Оценка прямых пирогенных эмиссий углерода в лесах России за 2020 год по данным дистанционного мониторинга // Вопросы лесной науки. Т. 3. № 4. 2020. С. 1–8.

Замолодчиков Д. Г., Коровин Г. Н., Уткин А. И., Честных О. В., Санген Б. Углерод в лесном фонде и сельскохозяйственных угодьях России. М.: КМК, 2005. 200 с.

Замолодчиков Д. Г., Уткин А. И., Честных О. В. Коэффициенты конверсии запасов на-

саждений в фитомассу для основных лесообразующих пород России // Лесная таксация и лесоустройство. Сибирский государственный технологический университет. 2003. Вып. 1 (32). С. 119–127.

Ковалева Н. М., Собачкин Р. С., Собачкин Д. С., Петренко А. Е. Структура горючих материалов в сосняках разного возраста Красноярской степи // Лесоведение. 2017. № 5. С. 431–436. DOI: 10.7868/S0024114817060055.

Курбатский Н. П. Исследование количества и состава лесных горючих материалов // Вопросы лесной пирологии. Красноярск: ИЛ СО АН СССР, 1970. С. 5–58.

Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Кашницкий А. В., Балашов И. В., Барталев С. А., Константинова А. М., Кобец Д. А., Мазуров А. А., Марченков В. В., Матвеев А. М., Радченко М. В., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.

Матвеева Т. А. Запасы лесных горючих материалов в горных лесах Южной Сибири // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2008. №12 (50). С. 30–33.

- Распоряжение Правительства Российской Федерации от 29 октября 2022 года №3240-р «Об утверждении инновационного проекта по созданию национальной системы мониторинга климатически активных веществ». 30 с. URL: <http://government.ru/docs/46939/> (дата обращения 14.11.2022).
- Сочилова Е. Н., Ершов Д. В., Коровин Г. Н.* Методы создания карт запасов лесных горючих материалов низкого пространственного разрешения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 6. № 2. С. 441–449.
- Стыценко Ф. В., Барталев С. А., Егоров В. А., Лупян Е. А.* Метод оценки степени повреждения лесов пожарами на основе спутниковых данных MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 254–266.
- Уткин А. И., Гульбе Я. И., Гульбе Т. А., Ермолова Л. С.* Биологическая продуктивность лесных экосистем. Компьютерная база данных. М.: ИЛ РАН, ЦЭПЛ РАН, 1994.
- Федоров Е. Н., Цыкалов А. Г.* Наземные горючие материалы в зеленомошных листовенничниках Средней Сибири // Лесоведение. 2002. № 6. С. 63–67.
- Фуряев В. В., Заблоцкий В. И., Злобина Л. П., Черных В. А., Самсоненко С. Д.* Комплексы напочвенных горючих материалов и возможность их регулирования в профилактике лесных пожаров // Лесное хозяйство. 2007. № 1. С. 43–44.
- Фуряев И. В., Дементьева, Ю. С., Фуряев В. В.* Структура комплексов напочвенных горючих материалов в насаждениях Верхне-Обского массива Алтайского края // Сборник трудов «Проблемы лесоведения и лесоводства». 2009. Вып. 69. С. 737–742.
- Цветков П. А.* Запасы горючих материалов в лесах северо-востока Эвенкии // Лесное хозяйство. 2001. № 4. С. 93–96.
- Швиденко А. З., Щепаченко Д. Г., Нильссон С., Булуй Ю. И.* Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы). Издание 2-е, доп. М: Федеральное агентство лесного хозяйства, 2008. 886 с.
- Швиденко А., Щепаченко Д., Нильссон С.* Оценка запасов древесного детрита в лесах России // Лесная таксация и лесоустройство. 2009. № 1 (41). С. 133–147.
- Шешуков М. А.* Влияние некоторых факторов среды на полноту сгорания горючих материалов и их критический запас при лесных пожарах // Лесоведение. 1970. № 4. С. 40–43.
- Щепаченко Д. Г., Мухортова Л. В., Швиденко А. З., Ведрова Э. Ф.* Запасы органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2013. № 2. С. 123–132.

- Kharuk V. I., Ponomarev E. I., Ivanova G. A., Dvinskaya M. L., Coogan S. C., Flannigan M. D.* Wildfires in the Siberian taiga // *Ambio*. 2021. Vol. 50. P. 1–22. DOI: 10.1007/s13280-020-01490-x.
- Ponomarev E., Yakimov N., Ponomareva T., Yakubailik O., Conard S. G.* Current trend of carbon emissions from wildfires in Siberia // *Atmosphere*. 2021. Vol. 12 (5). Article 559. DOI: 10.3390/atmos12050559.
- Shvidenko A. Z., Schepaschenko D. G.* Climate change and wildfires in Russia // *Contemporary Problems of Ecology*. 2013. Vol. 6. No. 7. P. 683–692. DOI: 10.1134/S199542551307010X
- Schepaschenko D., Moltchanova E., Shvidenko A., Blyshchyk V., Dmitriev E., Martynenko O., See L., Kraxner F.* Improved estimates of biomass expansion factors for Russian forests // *Forests*. 2018. Vol. 9. No. 6. Article 312. DOI: 10.3390/f9060312
- of Evenkia), Lesnoe hozjajstvo*, 2001, No 4, pp. 93–96.
- Ershov D. V., Bartalev S. A., Isaev A. S., Sochilova E. N., Styckenko F. V.* Metod ocenki pozharnyh jemissij parnikovyh gazov s ispol'zovaniem sputnikovyh dannyh: rezul'taty primenenija dlja lesov Rossii v 21 veke (Fire assessment method of greenhouse gas emission with satellite data: results of forest for Russia in the 21st century), *Ajerokosmicheskie metody i geoinformacionnye tehnologii v lesovedenii, lesnom hozjajstve i jekologii* (Aerospace Methods and GIS-Technologies in Forestry, Forest Management and Ecology), Proc. VI All-Russian Conference, Moscow, Russia, April 20-22, 2016, pp. 12–17.
- Ershov D. V., Kovganko K. A., Sochilova E. N.*, GIS-tehnologija ocenki pirogennyh jemissij ugleroda po dannym Terra-MODIS i gosudarstvennogo ucheta lesov (GIS-technology of fire carbon emission assessment using Terra-Modis products and state forest account data), *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa*, 2009, Issue 6, Vol. 2, pp. 365–372.
- Ershov D. V., Sochilova E. N.*, Dvadcatiletnjaja dinamika prjamyh pirogennyh jemissij ugleroda v lesah Rossii v 21 veke po dannym distancionnogo monitoringa (Twenty-year dynamics of direct pyrogenic carbon emissions in the forests of Russia in the 21st century according to remote

REFERENCES

Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Lupjan E. A., Plotnikov D. E., Hvostikov S. A., Shabanov N. V., *Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p.

Cvetkov P. A., Zapasy gorjuchih materialov v lesah severo-vostoka Jevenkii (Stocks of fire fuels in the forests of the north-east

- monitoring data), *Nauchnye osnovy ustojchivogo upravlenija lesami* (Scientific Basis for Sustainable Forest Management), Proc. IV All-Russian Conference, Moscow, Russia, April 21–25, 2022, pp. 267–269.
- Ershov D. V., Sochilova E. N., Ocenka prjamyh pirogennyh jemissij ugleroda v lesah Rossii za 2020 god po dannym distantsionnogo monitoringa (Assessment of direct pyrogenic carbon emissions in russian forests for 2020 using remote monitoring data), *Voprosy lesnoj nauki*, 2020, Vol. 3, No 4, pp. 1–8.
- Fedorov E. H., Cykalov A. G., Nazemnye gorjuchie materialy v zelenomoshnyh listvennichnikah Srednej Sibiri (Land fire fuels in green-moss larch forest of Central Siberia), *Lesovedenie*, 2002, No 6, pp. 63–67.
- Furjaev I. V., Dement'eva Ju. S., Furjaev V. V., Struktura kompleksov napochvennyh gorjuchih materialov v nasazhdenijah Verhne-Obsskogo massiva Altajskogo kraja (Structure of complexes of ground fire fuels in the stands of the Verkhne-Ob massif of the Altai Region), In: *Problemy lesovedenija i lesovodstva* (Problems of forest science and forestry), Issue 69, 2009, pp. 737–742.
- Furjaev V. V., Zablockij V. I., Zlobina L. P., Chernyh V. A., Samsonenko S. D., Kompleksy napochvennyh gorjuchih materialov i vozmozhnost' ih regulirovanija v profilaktike lesnyh pozharov (Complexes of ground fire fuels and the possibility of their regulation in the prevention of forest fires), *Lesnoe hozjajstvo*, 2007, No 1, pp. 43–44.
- Kharuk V. I., Ponomarev E. I., Ivanova G. A., Dvinskaya M. L., Coogan S. C. P., Flannigan M. D., Wildfires in the Siberian taiga, *Ambio*, 2021, Vol. 50, pp. 1953–1974, DOI: 10.1007/s13280-020-01490-x.
- Kovaleva N. M., Sobachkin R. S., Sobachkin D. S., Petrenko A. E., Struktura gorjuchih materialov v sosnjakah raznogo vozrasta Krasnojarskoj stepi (The structure of forest fuels in variously aged pine woodlands of forest steppe domain in Krasnoyarsk), *Lesovedenie*, 2017, No 5, pp. 431–436, DOI: 10.7868/S0024114817060055.
- Kurbatskij N. P., Issledovanie kolichestva i sostava lesnyh gorjuchih materialov (Investigation of quantity and composition of the forest fire fuels), In: *Voprosy lesnoj pirologii* (Questions of forest pyrology), Krasnojarsk, 1970, pp. 5–58.
- Lupjan E. A., Proshin A. A., Burcev M. A., Kashnickij A. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Konstantinova A. M., Kobec D. A., Mazurov A. A., Marchenkov V. V., Matveev A. M., Radchenko M. V., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Opyt jekspluatatsii i razvitija centra kollektivnogo pol'zovanija sistemami arhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovyh dannyh (CKP “IKI-Monitoring”) (Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data),

- Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No 3, pp. 151–170. DOI: 10.2104
- Matveeva T. A., Zapasy lesnyh gorjuchih materialov v gornyh lesah Juzhnoj Sibiri (Wood combustibles resources in mountain forests of south Siberia), *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2008, No 12 (50), pp. 30–33.
- Ponomarev E., Yakimov N., Ponomareva T., Yakubailik O., Conard S. G., Current trend of carbon emissions from wildfires in Siberia, *Atmosphere*, 2021, Vol. 12 (5), Article 559. DOI: 10.3390/atmos12050559.
- Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 29 oktyabrya 2022 goda № 3240-r* (Government Decree of the Russian Federation No 3240-r, October 29, 2022) "Ob utverzhdenii innovacionnogo proekta po sozdaniyu nacional'noj sistemy monitoringa klimaticheski aktivnyh veshchestv", 2022, 30 p., available at: URL: <http://government.ru/docs/46939/> (November 14, 2023).
- Schepaschenko D. G., Muhortova L. V., Shvidenko A. Z., Vedrova Je. F., Zapasy organicheskogo ugljeroda v pochvah Rossii (The pool of organic carbon in the soils of Russia), *Pochvovedenie*, 2013, No 2, pp. 123–132.
- Schepaschenko D., Moltchanova E., Shvidenko A., Blyshchyk V., Dmitriev E., Martynenko O., See L., Kraxner F., Improved estimates of biomass expansion factors for Russian forests, *Forests*, 2018, Vol. 9 (6), Article 312, DOI: 10.3390/f9060312
- Sheshukov M. A., Vlijanie nekotoryh faktorov sredy na polnotu sgoraniya gorjuchih materialov i ih kriticheskij zapas pri lesnyh pozharah (Impact of some environmental factors on complete combustion of fire fuels and their critical volume in case of forest fires), *Lesovedenie*, 1970, No 4, pp. 40–43.
- Shvidenko A. Z., Schepaschenko D. G., Climate change and wildfires in Russia, *Contemporary Problems of Ecology*, 2013, Vol. 6, No 7, pp. 683–692, DOI: 10.1134/S199542551307010X.
- Shvidenko A. Z., Schepaschenko D. G., Nil'sson S., Buluj Ju. I., *Tablicy i modeli hoda rosta i produktivnosti nasazhdenij osnovnyh lesoobrazujushchih porod Severnoj Evrazii* (normativno-spravochnye materialy) (Tables and models of growth and productivity of forests of major forest forming species of Northern Eurasia (standard and reference materials)), Moscow: Federal'noe agentstvo lesnogo hozjajstva, 2008, 803 p.
- Shvidenko A., Schepaschenko D., Nil'sson S., Ocenka zapasov drevesnogo detrita v lesah Rossii (Assessment of wood detritus storage in forests of Russia), *Lesnaja taksacija i lesoustrojstvo*, 2009, No 1 (41), pp. 133–147.
- Sochilova E. N., Ershov D. V., Korovin G. N., Metody sozdaniya kart zapasov lesnyh gorjuchih materialov nizkogo prostranstvennogo razresheniya (Methods of coarse resolution forest fuel load mapping), *Sovremennye problemy distancionnogo*

- zondirovanija Zemli iz kosmosa*, 2009, Vol. 2, Issue 6, pp. 441–449.
- Stycenko F. V., Bartalev S. A., Egorov V. A., Lupjan E. A., Metod ocenki stepeni povrezhdenija lesov pozharami na osnove sputnikovyh dannyh MODIS (Post-fire forest tree mortality assessment method using MODIS satellite data), *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No 1, pp. 254–266.
- Utkin A. I., Gul'be Ja. I., Gul'be T. A., Ermolova L. S., *Biologicheskaja produktivnost' lesnyh jekosistem* (Biological productivity of forest ecosystems), Database, Moscow: IL RAN, CEPL RAN, 1994.
- VEGA-RRO, available at: <http://pro-vega.ru> (November 29, 2022)
- Vonskij S. M., *Intensivnost' ognja nizovyh lesnyh pozharov i ee prakticheskoe znachenie* (The intensity of ground forest fires and their practical significance), Leningrad: LenNILH, 1957, 52 p.
- Zamolodchikov D. G., Korovin G. N., Utkin A. I., Chestnyh O. V., Sangen B., *Uglerod v lesnom fonde i sel'skhozajstvennyh ugod'-jah Rossii* (Carbon in forest and agricultural lands of Russia), Moscow: KMK, 2005, 200 p.
- Zamolodchikov D. G., Utkin A. I., Chestnyh O. V., Kojefficienty konversii zapasov nasazhdenij v fitomassu dlja osnovnyh lesoobrazujushhijh porod Rossii (Conversion factors of forest stocks volumes in biomass for the main dominated forest species of Russia), *Lesnaja taksacija i lesoustrojstvo*, 2003, Issue 1 (32), pp. 119–127.

QUANTITATIVE ESTIMATES OF DIRECT PYROGENIC CARBON EMISSIONS IN FORESTS OF RUSSIA ACCORDING TO REMOTE MONITORING DATA 2021

D. V. Ershov *, E. N. Sochilova

*Center for Forest Ecology and Productivity of the RAS
Profsoyuznaya st. 84/32 bldg. 14, Moscow, 117997, Russia*

* E-mail: dvershov67@gmail.com

Received: 28.11.2022

Revised: 15.12.2022

Accepted: 18.12.2022

The paper presents statistic of the amount of direct Carbon emissions during wildfires of 2021 in the forested lands of Russia using long-term satellite data. In 2021, the area of forest fire damages was 9.3 million hectares, and the amount of Carbon emissions was 66.4 MtC. These values are almost two points higher than the long-term average values. A comparison of similar indicators for twenty years allowed us to conclude that that year is anomalous with respect to the entire time series, similarly to the fire seasons of 2003 and 2012. The period or interval of recurrence of three anomalous fire seasons is nine years. We do not know the reason for the recurrence of anomalous fire seasons. At the same time, the forested areas damaged of the wildfires and the amount of direct Carbon and other greenhouse gases emissions in anomalous fire season years decreases from 127.2 MtC (3.7 p.) in 2003, 83.8 MtC (2.4 p.) in 2012 to 66.4 MtC (1.9 p.) in 2021.

Key words: *Wildfires, Pyrogenic Emissions, Carbon, Remote Sensing Monitoring, Forest Fire Fuels*

Рецензент: д. с.-х. н. Швиденко А. З.