

УДК 630*43

ЭМИССИИ ПРИ ПОЖАРАХ В НАСАЖДЕНИЯХ СРЕДНЕСИБИРСКОГО ПОДТАЕЖНО-ЛЕСОСТЕПНОГО РАЙОНА

В. А. Иванов^{1,2}, Г. А. Иванова¹, Е. О. Бакшеева², Д. В. Шебеко²

¹ Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН 660036, Красноярск, Академгородок, 50/28

² Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М. Ф. Решетнева 660037, Красноярск, проспект имени газеты «Красноярский рабочий», 31

E-mail: ivanovv53@yandex.ru, gaivanova@ksc.krasn.ru, morozovaelenabaksheeva@mail.ru, 2288401@bk.ru

Поступила в редакцию 11.04.2024 г.

Ежегодно на территории Среднесибирского подтаежно-лесостепного района возникают лесные пожары. За пятилетний период (с 2018 по 2022 г.) было зарегистрировано 1303 пожара на площади 87.5 тыс. га. В статье приведены расчеты эмиссии парниковых газов при пожарах в насаждениях лесного района за рассматриваемый период. Объем эмиссии при лесных пожарах определяется интенсивностью горения и метеоусловиями. По полученным данным о количестве сгорающих при пожаре лесных горючих материалов рассчитана масса парниковых газов (CO_2 , CH_4 , N_2O), выделяющихся во время горения в зависимости от типа насаждения и метеоусловий, влияющих на высыхание горючих материалов с использованием общепринятых методик. Выявлено, что ежегодно при пожарах в насаждениях Среднесибирского подтаежно-лесостепного района эмиссия парниковых газов составляет от 13.5 до 804 тыс. т. За рассматриваемый пятилетний период по расчетным данным выделилось при лесных пожарах более 1.2 млн т парниковых газов, с преобладанием $\text{CO}-\text{CO}_2$. Наибольшая доля эмиссии при пожарах (более 95 %) приходится на весенний пожароопасный период. Изменчивость коэффициента самоочищения атмосферы существенно различается по периодам пожароопасного сезона. Выявлено, что благоприятные условия рассеивания эмиссий от лесных пожаров на территории Среднесибирского подтаежно-лесостепного района складываются в весенний период, когда регистрируется наибольшее число ветреных дней.

Ключевые слова: лесные пожары, пожароопасный период, лесные горючие материалы, пожарные эмиссии, парниковые газы, самоочищение атмосферы.

DOI: 10.15372/SJFS20240505

ВВЕДЕНИЕ

Проблема качества атмосферного воздуха является актуальной в связи с необходимостью обеспечения благоприятных условий проживания населения и сохранения экосистем. Влияние различных видов хозяйственной деятельности в освоенном регионе на окружающую среду – один из главных, но не единственный фактор, под воздействием которого формируется определенный уровень загрязнения атмосферы (Корнилов и др., 2005; Чендев, Петин, 2006). Немаловажное значение при этом имеют природные

факторы, главный из которых – способность атмосферы к самоочищению (Лебедева, Крымская, 2003).

Наиболее разрушительное воздействие на лесные экосистемы и атмосферу оказывают пожары, которые вызывают кратковременные выбросы углерода в атмосферу (Kasischke et al., 1995; Софронов и др., 2000). Суммарное количество эмиссий углерода от природных пожаров в бореальных лесах России и Северной Америки сопоставимо с антропогенными выбросами. При сгорании тонны сухих лесных горючих материалов образуется в среднем 2.36 т парни-

ковых газов (Amiro et al., 2001; Ле Дык Хуинь и др., 2013). При пожарах в таежных сосновых и лиственничных лесах Средней Сибири выделяется эмиссия углерода – от 2.3 до 15.8 т/га в зависимости от интенсивности пожара, при этом газовая эмиссия достигает 11.3–35.5 т/га (Иванова, Иванов, 2015).

В результате действия пожаров растительности возникает задымленность лесных территорий. Пожары, особенно длительные, значительно изменяют состав воздуха. Предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ в области, оказавшейся под влиянием лесного пожара, могут превышать в несколько раз. При этом, по данным World Resources Institute (2024) и Global Forest Watch (2024), Россия является мировым лидером по потере лесного покрова (около 70 %), вызванной лесными пожарами. В начале августа 2010 г. вследствие лесных пожаров на значительной части Европейской территории России продолжительное время превышались как среднесуточные, так и максимальные разовые предельно допустимые концентрации, что привело, ухудшению состояния здоровья людей и экологической обстановки, и, как следствие, к повышению смертности среди населения. Повышенные концентрации загрязняющих веществ из-за выброса газообразных и дисперсных продуктов горения в атмосферу от лесных пожаров пагубно влияют не только на состояние здоровья людей и экологическую ситуацию в целом, но и на радиационные процессы в атмосфере, на процесс образования осадков и следовательно – на термодинамическое состояние атмосферы.

В связи с глобальным изменением климата особое внимание уделяется количественному содержанию парниковых газов в атмосфере. В соответствии с Указом Президента от 30.09.2013 № 752 «О сокращении выбросов парниковых газов» (2013) и Концепцией формирования системы мониторинга, отчетности и проверки объема выбросов парниковых газов в Российской Федерации (Распоряжение..., 2015) поставлена задача инвентаризации объема эмиссии парниковых газов во всех секторах экономики субъектов РФ. Лесная отрасль не стала исключением.

Целью нашего исследования стала оценка выбросов парниковых газов при лесных пожарах и самоочищения атмосферы в наиболее индустриально освоенном Среднесибирском подтаежно-лесостепном районе с высокой плотностью населения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для анализа горимости лесов Среднесибирского подтаежно-лесостепного района Красноярского края были использованы открытые данные о лесных пожарах за 2018–2022 гг., а также сведения о погоде по данным «ИСДМ-Рослесхоз» (Информационная система..., 2024) и литературные источники.

Массовый выброс парниковых газов можно определить с большей или меньшей точностью следующими методами: инструментальными, инструментально-лабораторными, индикаторными и расчетными. Для определения массового выброса парниковых газов мы применяли расчетный метод, основанный на использовании данных о составе лесных горючих материалов (ЛГМ), их запасах и характере пожара. Расчет объемов выбросов парниковых газов проводили по рекомендациям МГЭИК (Руководящие принципы..., 2006) и методике, утвержденной Приказом Минприроды России от 27.05.2022 № 371 (2022), которые устанавливают общие требования к расчету выбросов парниковых газов в атмосферу при неконтролируемом горении растительных горючих материалов при лесных пожарах разных видов (низовых, верховых и торфяных).

Оценку выбросов парниковых газов от пожара проводили по формуле

$$L_{\text{пожар}} = S \cdot M_{\text{сг}} \cdot K_{\text{эф}}, \quad (1)$$

где $L_{\text{пожар}}$ – количество выбросов парниковых газов от пожара, т каждого парникового газа; S – площадь пожара, га; $M_{\text{сг}}$ – масса ЛГМ, сгорающих при пожарах, кг/га; $K_{\text{эф}}$ – коэффициент выбросов, г/кг сгораемого сухого ЛГМ.

Масса сгоревших при пожаре ЛГМ на каждом лесном участке, пройденном огнем, находится через запас ЛГМ до пожара и долю ЛГМ, сгорающих при пожаре, в зависимости от класса пожарной опасности по условиям погоды (2):

$$M_{\text{сг}} = M_{\text{дп}} \cdot C_{\text{низ/верх}}, \quad (2)$$

где $M_{\text{сг}}$ – масса ЛГМ, сгорающих при пожаре, кг/га; $M_{\text{дп}}$ – масса ЛГМ до пожара, кг/га; $C_{\text{низ/верх}}$ – доля компонентов ЛГМ, сгорающая при низовом или верховом пожаре в зависимости от класса пожарной опасности по условиям погоды.

Класс пожарной опасности по условиям погоды показывает степень опасности возникнове-

Таблица 1. Запасы ЛГМ в насаждениях Среднесибирского подтаежно-лесостепного района, т/га

Насаждение	Запасы ЛГМ
Сосняки разнотравные	15.42 ± 0.32
Ельники разнотравные	20.55 ± 1.74
Березняки разнотравные	20.55 ± 1.74

ния пожаров в зависимости от погодных факторов (температура воздуха и осадки), влияющих на наличие влаги в лесных горючих материалах: I класс – очень малая пожарная опасность, II – малая пожарная опасность, III – средняя пожарная опасность, IV – высокая пожарная опасность, V класс – чрезвычайная пожарная опасность (Национальный стандарт..., 2023).

При пожаре горят мхи и лишайники, опад с мелкими (до 7 мм) сухими веточками, подстилка, травы и кустарнички, хвоя подроста и хвоя деревьев полога древостоя. Для оценки запасов ЛГМ для лесостепных насаждений использованы опубликованные ранее данные (Курбатский, Иванова, 1987; Иванов и др., 2017; Буряк, 2022) (табл. 1).

До пожара средние запасы ЛГМ в насаждениях варьировали от 15 до 22 т/га. Количество сгорающих ЛГМ зависит от силы и формы пожара (беглый или устойчивый), погодных условий и периода пожароопасного сезона. Долю компонентов ЛГМ, сгорающих при пожарах, для насаждений определяли при осмотре пожарищ и на основе опубликованных данных (Иванова, Иванов, 2015; Popomarev et al., 2021).

Доля сгорающих ЛГМ при пожаре в зависимости от класса пожарной опасности по условиям погоды и пожароопасного периода приведена в табл. 2.

Мощность выброса вредных веществ рассчитывается по формуле

$$G = m_{ai} / T, \quad (3)$$

где G – мощность выброса, т/сут; T – время продолжительности горения лесного участка, сут; m_{ai} – полное значение выбросов парниковых газов за время горения, т.

Одним из показателей чистоты воздуха служит коэффициент Т. С. Селегей (Отчет..., 2014). Ю. П. Переведенцев (2012) предложил показатель повторяемости туманов, который использовался в формуле Т. С. Селегей, заменить на показатель повторяемости среднесуточной от-

Таблица 2. Доля сгорающих ЛГМ при лесных пожарах в зависимости от класса пожарной опасности по условиям погоды и пожароопасного периода

Класс пожарной опасности	Насаждения		
	сосняки	ельники	березняки
Весенний период (апрель – май)			
I	0.34	0.10	0.17
II	0.49	0.20	0.31
III	0.61	0.25	0.38
IV	0.67	0.35	0.45
V	0.71	0.43	0.52
Летний период (июнь – август)			
I	0.39	0.18	0.30
II	0.54	0.29	0.37
III	0.77	0.55	0.62
IV	0.83	0.59	0.73
V	0.90	0.70	0.83
Осенний период (сентябрь – октябрь)			
I	0.39	0.18	0.30
II	0.50	0.21	0.37
III	0.76	0.52	0.61
IV	0.84	0.55	0.72
V	0.84	0.67	0.72

носительной влажности воздуха $\geq 80\%$. Для оценки экологического состояния атмосферы мы использовали коэффициент самоочищения (Переведенцев, 2012), рассчитываемый по формуле

$$K_m = (P_{\text{сил}} + P_{\text{ос}}) / (P_{\text{сл}} + P_w \geq 80\%), \quad (4)$$

где K_m – коэффициент самоочищения атмосферы; $P_{\text{сил}}$ – повторяемость скорости ветра ≥ 6 м/с; $P_{\text{ос}}$ – повторяемость осадков ≥ 0.5 мм; $P_{\text{сл}}$ – повторяемость слабого ветра (0–1 м/с); P_w – повторяемость среднесуточной относительной влажности $\geq 80\%$.

Количественная оценка метеорологических условий по критерию K_m : $K_m < 0.8$ – неблагоприятные условия для рассеивания; $0.8 \leq K_m \leq 1.2$ – ограниченно благоприятные условия рассеивания; $K_m > 1.2$ – благоприятные условия самоочищения атмосферы; $K_m > 1$ показывает, что повторяемость процессов, способствующих самоочищению атмосферы, преобладает над повторяемостью процессов, содействующих накоплению в ней вредных веществ (Крымская и др., 2016).

Метеорологические показатели по температуре и осадкам были проанализированные по метеостанциям Ачинск, Красноярск и Канск (Расписание погоды, 2024).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Территория Среднесибирского подтаежно-лесостепного района в границах Красноярского края составляет свыше 3 млн га и включает 15 лесничеств. Преобладают сосновые и березовые насаждения, но значительно представлены и еловые. Местность равнинная, средний класс природной пожарной опасности 2,8, степень нарушенности лесов средняя, плотность населения высокая и составляет от 2,6 до 8,66 чел./км² (Буряк, Котельников, 2023).

Несмотря на относительную однородность территории по природным условиям, горимость лесных участков района варьирует в широких пределах. За пятилетний период с 2018 по 2022 г. было зарегистрировано 1303 пожара на площади более 87,5 тыс. га (рис. 1).

Наибольшее количество и площадь пожаров зарегистрированы в 2022 г. – 489 пожаров на площади 57,7 тыс. га. Средняя площадь одного пожара за пятилетие составила 67 га, с колебаниями от 9,3 га в 2021 г. до 233 га в 2022 г. На территории лесного района за 2018–2022 гг. пройдено низовыми пожарами 98 % лесной площади. Верховые пожары зарегистрированы весной 2022 г. в сосновых насаждениях на площади 2,2 тыс. га. Фактическая продолжительность пожароопасного сезона по годам варьировала от 103 дней в 2018 г. до 197 дней в 2021 г.

Анализ сезонного распределения количества и площади пожаров выявил, что первые пожары возникали в начале апреля. Наиболее напряженным в пожарном отношении был май (рис. 2).

Пройденная пожарами площадь в весенний период составляет до 95 % от общей площади всех пожаров. В весенне-осенний период по-

жары имели беглую форму, а в летний период – устойчивую. Преобладали пожары слабой силы.

Распределение площади пожаров в насаждениях Среднесибирского подтаежно-лесостепного района по годам приведено в табл. 3. К наиболее горимым относятся сосновые и березовые насаждения, соответственно 58,9 и 35 % от общей площади, пройденной пожарами. На территории района преобладают насаждения с травяным напочвенным покровом.

Количество и состав пожарных эмиссий зависят от типа леса, количества сгоревших горючих материалов, вида и формы пожара, метеорологических условий и режимов горения (Иванов, Макаров, 2002; Куценогий и др., 2003; Samsonov et al., 2005).

На полноту сгорания лесных горючих материалов оказывает влияние множество факторов, но преобладающим является их влагосодержание, которое определяется погодными условиями (Курбатский, 1970). Также на полноту сгорания ЛГМ влияет и период пожароопасного сезона. В весенний период (апрель–май), после схода снега, верхний слой опада быстро достигает состояния пожарной зрелости, но при этом подстилка может находиться в замерзшем состоянии или быть пропитанной растаявшим снегом и влажной. В летний период (июнь–август) наблюдается минимальное влагосодержание опада и подстилки, а осенью (сентябрь–октябрь) их влагосодержание возрастает вследствие частых дождей.

По мнению Н. С. Смирнова с соавт. (2015; Smirnov et al., 2015), расчет выбросов пожарных эмиссий (черного углерода) должен проводиться на постоянной основе с пространственной и сезонной детализацией, т. е. при расчете

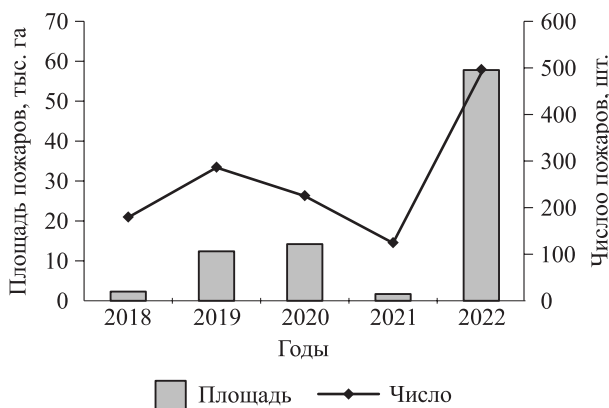


Рис. 1. Горимость лесов Среднесибирского подтаежно-лесостепного района за 2018–2022 гг.

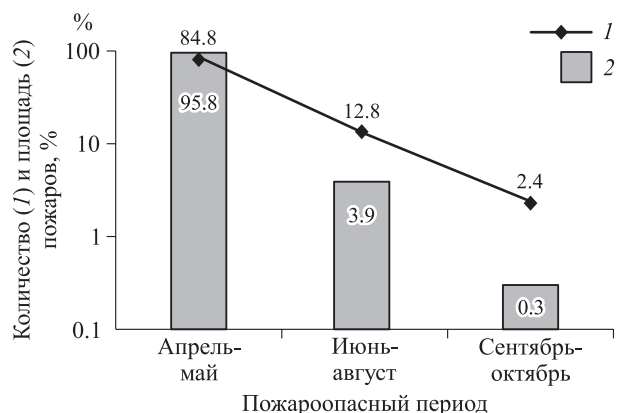


Рис. 2. Сезонная горимость лесов Среднесибирского подтаежно-лесостепного района за 2018–2022 гг.

Таблица 3. Распределение ежегодной площади пожаров (га) в насаждениях Среднесибирского подтаежно-лесостепного района

Насаждения	Год					Всего
	2018	2019	2020	2021	2022	
Сосновые	981.5	8446.9	8042.2	410.3	33 764.6	51 645.5
Еловые	24.8	107.4	30.8	10.5	763.0	936.5
Березовые	1250.1	3777.8	5923.2	781.8	23 237.4	34 970.3
Итого ...	2 256.4	12 332.1	13 996.2	1202.6	57 765.0	87 552.3

Таблица 4. Сезонное распределение площади пожаров (га) по классам пожарной опасности и периодам пожароопасного сезона

Пожароопасный период	Класс пожарной опасности по условиям погоды					Всего
	I	II	III	IV	V	
Сосновые насаждения						
Весенний	2580	2989	37 885.9	5000	–	48 454.9
Летний	110.6	389.9	892.9	1692.6	–	3086
Осенний	8.9	1.4	60.4	33.9	–	104.6
Итого ...	2699.5	3380.3	38 839.2	6726.5	–	51 645.5
Березовые насаждения						
Весенний	5729.6	7841.4	16 695.4	4281.5	–	34 547.9
Летний	16.5	128.6	124.1	63.6	16	348.8
Осенний	20	–	53.6	–	–	73.6
Итого ...	5766.1	7970	16 873.1	4345.1	16	34 970.3
Еловые насаждения						
Весенний	1	51.4	796	40.2	–	888.6
Летний	–	21.9	20	6	–	47.9
Осенний	–	–	–	–	–	–
Итого ...	1	73.3	816	46.2	–	936.5
Все насаждения						
Весенний	8310.6	10 881.8	55 377.3	9321.7	–	83 891.4
Летний	127.1	540.4	1037	1762.2	16	3482.7
Осенний	28.9	1.4	114	33.9	–	178.2
Всего ...	8466.6	11 423.6	56 528.3	11 117.8	16	87 552.3

пожарных эмиссий необходимо учитывать пожароопасный период и погодные условия, предшествующие пожару.

В табл. 4 приведено распределение площади пожаров по периодам пожароопасного сезона и классам пожарной опасности по условиям погоды в насаждениях Среднесибирского подтаежно-лесостепного района за 2018–2022 гг. Наибольшее количество пожаров зарегистрировано при III–IV классах пожарной опасности, когда опад и верхний слой подстилки достигают состояния пожарной зрелости. Пройденная пожарами площадь при этом превышала 67.6 тыс. га, или 77 % от площади всех пожаров за рассматриваемый период.

Расчетное количество сгоревших ЛГМ при пожарах в насаждениях Среднесибирского под-

таежно-лесостепного района 2018–2022 гг. в зависимости от класса пожарной опасности по условиям погоды и площади пожаров приведено в табл. 5.

Доля сгорающих ЛГМ, которую мы использовали для расчета выбросов эмиссий при пожарах, определена на основе наших экспериментальных данных: 1.1–9.7 т/га при слабом, 8.6–21.5 т/га при среднем и более 21.5 т/га при сильном пожаре (Иванова, Иванов, 2015), что также согласуется с литературными данными (Ponomarev et al., 2021).

Количество сгоревших ЛГМ при пожарах за пятилетний период – более 674.3 тыс. т. Наибольшая доля сгоревших ЛГМ приходится на весенний период – более 643.6 тыс. т, как и наибольшая площадь, пройденная пожарами.

Таблица 5. Количество сгоревших ЛГМ при лесных пожарах за период 2018–2022 гг., т

Год	Класс пожарной опасности по условиям погоды					Всего
	I	II	III	IV	V	
Весенний период						
2018	837	4152	2674.7	–	–	7663.7
2019	566.6	14 586	64 383.9	3228.3	–	82 764.8
2020	342.5	5432.8	64 720.3	46 156	–	116 651.6
2021	799.6	2137	2874.4	–	–	5811
2022	27 775	37 483	33 0140	35 365	–	430 763
Итого ...	30 320.7	63 790.8	464 793.3	84 749.3	–	643 654.1
Летний период						
2018	1319.6	6012.9	3504.8	1218.7	–	12 056
2019	685.3	2864.7	2780.3	1806.3	27.7	8164.3
2020	–	18.9	343.2	253.5	–	615.6
2021	–	465.1	1288.1	–	–	1753.2
2022	41	61.7	6183.3	–	–	6286
Итого ...	2045.9	9423.3	14 099.7	3278.5	27.7	28 875.1
Осенний период						
2018	101	10.7	457	–	–	568.7
2019	–	–	786.6	–	–	786.6
2020	–	–	–	–	–	–
2021	53.4	–	7	437.6	–	498
2022	–	–	–	–	–	–
Итого ...	154.4	10.7	1250.6	437.6	–	1853.3
Всего ...	32 521	73 224.8	480 143.6	88 465.4	27.7	674 382.5

Оценка эмиссий парниковых газов при пожарах. За рассматриваемый период 2018–2022 гг. выброс эмиссии парниковых газов от лесных пожаров составил 1224 тыс. т (табл. 6).

Максимальный объем эмиссии (804.8 тыс. т) был в 2022 г., а минимальный (13.5 тыс. т) – в 2021 г. (табл. 7). При этом газы CO₂–CO составляли за пятилетие 1218 тыс. т, или более 99 % от всех выбросов. В среднем эмиссия парниковых газов от лесных низовых пожаров за рассматриваемый период варьировала по годам от 11.28 до 14.63 т/га. Выброс эмиссии парниковых газов в весенний период составил 13.7 т/га, в летний – 19.5 т/га, а в осенний – 17.4 т/га, что близко к оценкам эмиссии от пожаров, которые для Сибири составляют в среднем от 16 до 18 т/га (Ponomarev et al., 2021).

Выброс эмиссии при лесных низовых пожарах в Среднесибирском подтаежно-лесостепном районе значительно меньше, чем при пожарах в Нижнеангарском таежном районе, где они варьируют от 21.0 до 31.4 т/га (Иванов и др., 2021). Это связано с тем, что на территории рассматриваемого района преобладают лесные пожары в весенний период, когда происходит медленное оттаивание и высыхание напочвенных ЛГМ.

По данным М. С. Смирнова (2015; Smirnov et al., 2015), среднегодовой выброс черного углерода (сажи) с 1 га пройденной пожарами площади составил 10.2 ± 1.2 кг. По нашим расчетам, среднегодовой выброс сажи был около 4.82 кг/га, что в 2 раза ниже. Разница в оценке выбросов черного углерода, по нашему мнению, связана с тем, что мы учитывали только массу ЛГМ, которая, с большой вероятностью, сгорела при пожарах, а не всю массу ЛГМ в насаждении.

Выбросы эмиссии парниковых газов отличаются значительной сезонной и годовой изменчивостью, связанной с вариацией общей площади пожаров и погодных условий. Объемы эмиссий от пожаров в отдельные годы могут превышать минимальные значения более чем в 33 раза. Например, эмиссии при пожарах в 2018 г. составили 23.4 тыс. т, а в 2022 г. – 804.6 тыс. т.

Наибольшая продолжительность действия лесных пожаров зарегистрирована в 2018 г. (99 дней), а наименьшая – в 2021 г. (49 дней). В среднем дымовая эмиссия во время действия пожаров в 2018 г. составила в сутки 276.8 т, 2019 г. – 1880.4 т, 2020 г. – 3468.6 т, 2021 г. – 276.8 т, 2022 г. – 12575.9 т.

На территории района расположено свыше 500 населенных пунктов. Пожары в 65 % случаев

Таблица 6. Эмиссии парниковых газов при лесных пожарах по годам и периодам пожароопасного сезона

Год	Выбросы парниковых газов и сажи, т						
	CO ₂	CO	CH ₄	N ₂ O	NOx	Сажа	Всего
Весенний период							
2018	12 024.34	820.01	36.02	1.99	22.99	4.29	12 909.64
2019	129 701.10	8845.13	388.52	21.49	247.99	46.29	139 250.52
2020	183 183.41	12 492.43	548.21	30.35	350.25	66.48	196 671.13
2021	9117.61	621.78	27.31	1.51	17.43	3.25	9788.89
2022	739 788.20	50 450.8	2216.06	122.59	1414.5	278.18	794 270.33
Итого ...	107 814.66	7330.15	3216.12	177.93	2053.16	398.49	115 290.51
Летний период							
2018	12 585.7	858.30	37.70	2.08	24.06	4.49	13 512.33
2019	37 202.87	2537.09	111.44	6.16	71.13	13.27	39 941.96
2020	965.87	65.86	2.89	0.16	1.84	0.34	1036.96
2021	2750.45	187.57	8.23	0.45	5.25	0.98	2952.93
2022	9862.73	672.60	29.54	1.63	18.85	3.52	10 588.87
Итого ...	63 367.62	4321.42	189.80	10.48	121.13	22.60	68 033.05
Осенний период							
2018	892.3	60.85	2.67	0.15	1.70	0.33	958
2019	1234.17	84.16	3.69	0.20	2.35	0.44	1325.01
2020	–	–	–	–	–	–	–
2021	767.24	52.32	2.29	0.12	1.46	0.27	823.70
2022	–	–	–	–	–	–	–
Итого ...	2893.71	197.33	8.65	0.47	5.51	1.04	3106.71
Пожароопасный сезон							
2018	25 502.34	1739.16	76.39	4.22	48.75	9.11	27 379.97
2019	168 138.14	11 466.38	503.65	27.85	321.47	60.0	180 517.49
2020	184 149.28	12 558.29	551.1	30.51	352.09	66.82	197 708.09
2021	12 635.3	861.67	37.83	2.08	24.14	4.5	13 565.52
2022	749 650.93	51 123.4	2245.6	124.22	1433.35	281.7	804 859.20
Всего ...	1140 075.99	77 748.90	3414.57	188.88	2179.80	422.13	122 4030.27

Таблица 7. Удельная эмиссия парниковых газов при лесных пожарах в Среднесибирском подтаежно-лесостепном районе

Год	Площадь, пройденная пожарами, га	Эмиссия			
		парниковых газов, т	удельная газов, т/га	сажи, т	удельная сажи, кг/га
2018	2256.4	27 370.86	12.13	9.11	4.04
2019	12 332.1	180 457.49	14.63	60.0	4.86
2020	13 996.2	197 641.27	14.12	66.82	4.77
2021	1202.6	13 561.02	11.28	4.5	3.74
2022	57 765	804 577.5	13.93	281.7	4.88
Всего ...	87 552.3	1223 608.14	13.98	422.13	4.82

регистрируются на расстоянии от 0.1 до 5 км от населенного пункта. Экологическое состояние атмосферы для данного района очень актуально. Количественная оценка метеорологических условий по коэффициенту самоочищения атмосферы по трем метеостанциям, расположенным в Среднесибирском подтаежно-лесостепном районе, за период 2018–2022 гг. приведена в табл. 8.

Анализ изменения коэффициента самоочищения по пожароопасным периодам позволяет выявить сезонные особенности накопления и рассеивания пожарных эмиссий. В западной части Среднесибирского подтаежно-лесостепного района (м/с Ачинск) и в восточной части лесного района (м/с Канск) с 2018 по 2022 г. наблюдались благоприятные условия для их рассеивания

Таблица 8. Метеорологический потенциал самоочищения атмосферы на территории Среднесибирского подтаежно-лесостепного района за 2018–2022 гг.

Год	Пожароопасный период			Среднее значение за пожароопасный сезон
	весенний	летний	осенний	
М/с Ачинск				
2018	2.1	0.4	0.74	0.98
2019	2.4	1.25	1.09	1.48
2020	2.6	0.9	1.23	1.48
2021	3.12	0.7	1.47	1.61
2022	4.27	1.13	1.01	1.83
М/с Красноярск (Опытное поле)				
2018	1.1	0.42	0.40	0.60
2019	0.78	0.42	0.69	0.60
2020	-	0.46	0.42	0.44
2021	1.29	0.50	0.30	0.66
2022	1.12	2,50	0.99	1.67
М/с Канск				
2018	4.2	0.68	0.88	1.74
2019	4.7	1.06	1.39	2.20
2020	2.1	1.03	2.20	1.69
2021	3,0	0,59	0.93	1.37
2022	1.75	1.22	1.26	1.38

($K_m \geq 1.2$) в наиболее пожароопасный весенний период. Ограниченно благоприятные и благоприятные условия для их рассеивания наблюдались в этих районах в отдельные годы и в летний и осенний периоды. В центральной части лесного района (м/с Опытное поле, Красноярск) только в весенний период регистрировались ограниченно благоприятные условия рассеивания, а в остальные периоды пожароопасного сезона погодные условия не способствовали очищению атмосферы ($K_m < 0.8$), исключение составил летний период 2022 г. ($K_m \geq 2.5$).

Вариабельность среднего значения коэффициента самоочищения за пожароопасный сезон находится в интервале 0.44–2.2. Максимальная изменчивость среднегодовых значений коэффициента самоочищения зафиксирована в восточной части лесного района ($K_m = 2.2$), минимальная – в центральной части ($K_m = 0.44$). Наибольшая повторяемость скоростей ветра ≥ 6 м/с и наименьшая повторяемость среднесуточной относительной влажности воздуха наблюдались в весенний период, что благоприятно повлияло на процессы самоочищения атмосферы в этот период. Подобные различия обусловлены рельефом местности, лесорастительными

условиями и территориальными различиями в повторяемости элементов циркуляции атмосферы (Лебедева, Крымская, 2010).

В ряде научных работ содержится предположение, что при природных пожарах аэрозольные частицы, включающие черный углерод, могут переноситься конвективными потоками до высот нижней стратосферы и распространяться на сотни и тысячи километров. Достигая льдов Арктики, они изменяют их альбедо и ускоряют таяние льдов (Вивчар и др., 2010; Vivchar et al., 2010; Смирнов и др., 2015; Кузнецов и др., 2023).

В районе исследования в весенний период преобладают лесные пожары слабой силы, беглые. При них происходит кромочное горение шириной от 0.3 до 2 м. Конвективная колонка от пожаров слабой силы поднимается на высоту, не превышающую 300–400 м. При этом перед фронтом пожара образуется нисходящий поток воздуха, который прижимает дымовой шлейф к поверхности земли и не дает распространяться на большие расстояния. Поэтому сомнительно, что частицы от пожаров в данном лесном районе могут достигать льдов Арктики.

В более северных районах, где накопились большие запасы ЛГМ из-за редкой повторяемости пожаров – межпожарный интервал варьирует от 31.1 до 64.4 года (Иванова, Иванов, 2015), лесные пожары распространяются на огромные площади. При горении образуются конвективные колонки, высота которых может достигать нескольких километров, и дым от пожаров распространяется на значительные расстояния и могут достигать Арктику.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, наши расчеты показали, что на территории Среднесибирского подтаежно-лесостепного района выбросы эмиссии парниковых газов от лесных пожаров в 2018–2022 гг. составили более 1223 тыс. т. Наибольший объем выбросов (94 %) приходится на весенний пожароопасный период. В среднем за 2018–2022 гг. эмиссии от пожаров на территории Среднесибирского подтаежно-лесостепного района составили 14 т/га, что значительно ниже, чем в Нижнеангарском таежном лесном районе, где объем эмиссии при низовых пожарах составляет по расчетным данным (Иванов и др., 2021) в среднем 26.1 т/га. Это объясняется тем, что на его территории преобладают лесные пожары в летний период, при благоприятных погодных условиях и происходит быстрое высыхание лес-

ных горючих материалов. При выполнении расчетного мониторинга пожарных эмиссий важно рассматривать количество возможного сгорания ЛГМ по периодам пожароопасного сезона и с учетом погодных условий во время возникновения и развития лесных пожаров.

Коэффициент самоочищения атмосферы существенно изменяется по территории и по периодам пожароопасного сезона. Наиболее неблагоприятные условия самоочищения атмосферы формируются в течение всего пожароопасного сезона в центральной части лесного района, где наблюдается значительная концентрация населения и промышленных объектов, что требует увеличения эффективности охраны лесов от пожаров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Буряк Л. В. Зонально-географические особенности воздействия пожаров на лесообразование светлохвойных насаждений юга Сибири. Новосибирск: Наука, 2022. 284 с.
- Буряк Л. В., Котельников Р. В. Краткий справочник эколого-географических и лесопирологических особенностей лесных районов. Пушкино: ВНИИЛМ, 2023. 87 с.
- Вивчар А. В., Моисеенко К. Б., Панкратова Н. В. Оценка эмиссии оксида углерода от природных пожаров в Северной Евразии в приложении к задачам регионального атмосферного переноса и климата // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. № 3. С. 307–320.
- Иванов В. А., Иванова Г. А., Москальченко С. А., Коршунов Н. А. Лесные горючие материалы и пожароопасность насаждений Сибири: Справ. учеб. Красноярск: СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2017. 93 с.
- Иванов В. А., Иванова Г. А., Бакиеева Е. О., Морозов А. С. Оценка эмиссии парниковых газов при пожарах в светлохвойных лесах Нижнего Приангарья // Сиб. лесн. журн. 2021. № 6. С. 3–17.
- Иванов А. В., Макаров В. И. Оценка объема эмиссий при сгорании некоторых видов лесных горючих материалов // Оптика атмосферы и океана. 2002. Т. 15. № 5–6. С. 488–490.
- Иванова Г. А., Иванов А. В. Пожары в сосновых лесах Средней Сибири. Новосибирск: Наука, 2015. 240 с.
- Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз). Пушкино, 2024. https://public.aviales.ru/main_pages/public.shtml
- Корнилов А. Г., Петин А. Н., Назаренко Н. В. Проблемы экологической безопасности Белгородской области и управления рациональным природопользованием // Пробл. регион. экол. 2005. № 6. С. 38–52.
- Крымская О. В., Лебедева М. Г., Бузакова И. В., Сторожилова Е. Ю. Метеорологический потенциал самоочищения атмосферного воздуха в Белгородской области // Науч. вед. Сер. Естеств. науки. 2016. № 4 (225). Вып. 34. С. 124–129.
- Кузнецов Л. Е., Залесов С. В., Кректунов А. А., Секе-рин И. М. Оценка влияния лесных пожаров на качество воздуха в границах города Тюмени // Междунар. науч.-иссл. журн. 2023. Вып. № 8 (134). Статья 78.
- Курбатский Н. П. Исследование количества и свойств лесных горючих материалов // Вопросы лесной пирологии: Сб. науч. тр. Красноярск: Ин-т леса и древесины им. В. Н. Сукачева СО АН СССР, 1970. С. 5–58.
- Курбатский Н. П., Иванова Г. А. Пожароопасность сосняков лесостепи и пути ее снижения. Красноярск: Ин-т леса и древесины им. В. Н. Сукачева СО АН СССР, 1987. 112 с.
- Куценогий К. П., Самсонов Ю. Н., Чуркина Т. В., Иванов А. В., Иванов В. А. Содержание микроэлементов в аэрозольной эмиссии при пожарах в бореальных лесах Центральной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2003. Т. 16. № 5–6. С. 461–465.
- Лебедева М. Г., Крымская О. В. Экология региона. Ч. 1. Качество атмосферного воздуха в городах Центрально-Черноземного региона. Белгород: Политерра, 2003. 74 с.
- Лебедева М. Г., Крымская О. В. Оценка химической активности атмосферы в промышленных центрах Белгородской области // Науч. вед. БелГУ. Естеств. науки. 2010. Т. 10. № 3. С. 117–122.
- Ле Дык Хуинь, Нгуен Тхи Тху Ха, Смирнов А. П. Эмиссия углерода от лесных пожаров 2002 г. в национальном парке «У Минь Тхьонг» на юге Вьетнама // Безопасность жизнедеятельности. 2013. № 12. С. 28–32.
- Национальный стандарт Российской Федерации. Охрана лесов от пожаров. Термины и определения. М.: Рос. ин-т стандарт., 2023. 27 с.
- Переведенцев Ю. П., Хабутдинов Ю. Г. Метеорологический потенциал самоочищения и качество атмосферного воздуха в Казани в последние десятилетия // Вестн. Удмурт. гос. ун-та. 2012. № 3. С. 23–28.
- Приказ Минприроды России от 27.05.2022 № 371 «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов». М.: Мин-во природ. ресурсов и экол. РФ, 2022.
- Расписание погоды, 2024. <https://rp5.ru/>
- Распоряжение Правительства Российской Федерации от 22.04.2015 № 716-р «Об утверждении Концепции формирования системы мониторинга, отчетности и проверки объема выбросов парниковых газов в Российской Федерации». М.: Правительство РФ, 2015. 12 с.
- Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов. Т. 4. Сельское хозяйство, лесное хозяйство и другие виды землепользования. Программа МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов. М.: МГЭИК, 2006.
- Отчет о научно-исследовательской работе по теме 1.4.3.15 «Разработать усовершенствованный комплексный метеорологический показатель рассеивающей способности атмосферы (на примере территории Западной Сибири)» (заключительный) / Рук. темы к. г. н. Т. С. Селегей. Новосибирск: СибНИГМИ, 2014. 131 с.
- Смирнов Н. С., Коротков В. Н., Романовская А. А. Выбросы черного углерода от природных пожаров на землях лесного фонда Российской Федерации в 2007–2012 гг. // Метеорол. и гидрол. 2015. № 7. С. 5–17.
- Софронов М. А., Швиденко А. З., Голдаммер И. Г., Волокитина А. В. Влияние пожаров на баланс углерода в бореальной зоне Северной Евразии: создание инфор-

- мационной базы для моделей // Лесоведение. 2000. № 4. С. 3–8.
- Указ Президента Российской Федерации от 30.09.2013 № 752 «О сокращении выбросов парниковых газов». М.: Канцелярия Президента РФ, 2013. 1 с.
- Чендев Ю. Г., Петин А. Н. Естественные изменения и техногенная трансформация компонентов окружающей среды староосвоенных регионов (на примере Белгородской области). М.: Изд-во МГУ, 2006. 123 с.
- Amiro B. D., Todd J. B., Wotton B. M., Logan K. A., Flannigan M. D., Stocks B. J., Mason J. A., Martell D. L., Hirsch K. G. Direct carbon emissions from Canadian forest fires, 1959–1999 // *Can. J. For. Res.* 2001. V. 31. N. 3. P. 512–525.
- Global forest watch, 2024. <http://www.globalforestwatch.org/>
- Kasischke E. S., Christensen N. L., Stocks B. J. Fire, global warming, and the carbon balance of boreal forests // *Ecol. Appl.* 1995. V. 5. Iss. 2. P. 437–451.
- Ponomarev E., Yakimov N., Ponomareva T., Yakubailik O., Conard S. G. Current trend of carbon emissions from wildfires in Siberia // *Atmosphere.* 2021. V. 12. Iss. 5. Article 559.
- Samsonov Yu. N., Koutsenogii K. P., Makarov V. I., Ivanov A. V., Ivanov V. A., McRae D. J., Conard S. G., Baker S. P., Ivanova G. A. Particulate emissions from fires in central Siberian Scots pine forests // *Can. J. For. Res.* 2005. V. 35. N. 9. P. 2207–2217.
- Smirnov N. S., Korotkov V. N., Romanovskaya A. A. Black carbon emissions from wildfires on forest lands of the Russian Federation in 2007–2012 // *Rus. Meteorol. Hydrol.* 2015. V. 40. P. 435–442 (Original Rus. Text © N. S. Smirnov, V. N. Korotkov, A. A. Romanovskaya, 2015, publ. in *Meteorologiya i Gidrologiya.* 2015. N. 7. P. 5–17).
- Vivchar A. V., Moiseenko K. B., Pankratova N. V. Estimates of carbon monoxide emissions from wildfires in northern Eurasia for air quality assessment and climate modeling // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2010. V. 46. N. 3. P. 281–293 (Original Rus. Text © A. V. Vivchar, K. B. Moiseenko, N. V. Pankratova, 2010, publ. in *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana.* 2010. V. 46. N. 3. P. 307–320).
- World Resources Institute, 2024. <http://www.wri.org/>

EMISSIONS FROM FIRES IN THE STANDS OF CENTRAL SIBERIAN SUBTAIGA-FOREST-STEPPE REGION

V. A. Ivanov^{1,2}, G. A. Ivanova¹, E. O. Baksheeva², D. V. Shebeko²

¹ V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation

² Reshetnev Siberian State University of Science and Technology Prospekt imeni gazety «Krasnoyarskiy rabochiy», 31, Krasnoyarsk, 660037 Russian Federation

E-mail: ivanovv53@yandex.ru, gaivanova@ksc.krasn.ru, morozovaelenabaksheeva@mail.ru, 2288401@bk.ru

Forest fires occur annually on the territory of the Central Siberian subtaiga-forest-steppe region. During the five-year period from 2018 to 2022, 1303 fires were registered. The areas covered by forest fires during this period amounted to 87.5 thousand hectares. The article presents calculations of greenhouse gas emissions from fires in forest area plantations for the period under review. The volume of emissions from forest fires is determined by the intensity of burning and weather conditions. Using the data obtained on the amount of combustible forest materials burned in a fire, the mass of greenhouse gases (CO₂, CH₄, N₂O) released during combustion was calculated, depending on the type of planting and weather conditions affecting the drying of combustible materials using generally accepted methods. It was revealed that greenhouse gas emissions range from 13.5 thousand tons to 804 thousand tons annually during fires in plantations of the Central Siberian subtaiga-forest-steppe region. Over the five-year period under review, according to estimates, more than 1.2 million tons were released during forest fires. greenhouse gases, with a predominance of CO–CO₂. The largest share of emissions from fires (more than 95 %) falls on the spring fire season. The variability of the self-purification coefficient of the atmosphere varies significantly by periods of the fire season. It was revealed that favorable conditions for the dispersion of emissions from forest fires in the territory of the Central Siberian subtaiga-forest-steppe region develop in the spring period, when the largest number of windy days is recorded.

Keywords: forest fires, fire-hazardous period, forest combustible materials, fire emissions, greenhouse gases, self-purification of the atmosphere.

How to cite: Ivanov V. A., Ivanova G. A., Baksheeva E. O., Shebeko D. V. Emissions from fires in the stands of Central Siberian subtaiga-forest-steppe region // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2024. N. 5. P. 47–56 (in Russian with English abstract and references).