

УДК 630.431:614.841.2

ВЛИЯНИЕ ПЕРИОДИЧНОСТИ НИЗОВЫХ ПОЖАРОВ НА ЗАПАС ЛЕСНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ СРЕДНЕВОЗРАСТНЫХ СОСНЯКОВ В ЛЕСОСТЕПИ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ¹

© 2024 г. Р. С. Собачкин^а, *, Н. М. Ковалева^а

^аИнститут леса им. В.Н. Сукачева СО РАН,
Академгородок, д. 50, стр. 28, Красноярск, 660036 Россия

* E-mail: romans@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 18.09.2023 г.

После доработки 16.01.2024 г.

Принята к публикации 08.02.2024 г.

Значительные лесные площади на территории Красноярского края ежегодно подвергаются пожарам, которые приводят к трансформации лесных фитоценозов, а также изменению запасов и структуры лесных горючих материалов. Информация о динамике накопления лесных горючих материалов может служить основой для управления пирогенной устойчивостью лесных насаждений. С целью оценки влияния ранневесенних низовых пожаров разной периодичности на динамику, структуру и запасы лесных горючих материалов проведены экспериментальные выжигания в средневозрастных сосняках разнотравно-зеленомошных в лесостепной зоне Красноярского края. Смоделированы экспериментальные пожары разной периодичности (ежегодные, с интервалом в 2–3 года и однократное выжигание). Независимо от периодичности выжиганий в первые 2–3 года наблюдается увеличение общего запаса лесных горючих материалов, при последующих выжиганиях данный показатель снижается до значений, близких к допожарным. Изменяется структура лесных горючих материалов, в результате чего снижается потенциальная горимость сосняков. Уменьшается доля хвои и коры в опаде, доля шишек увеличивается. Отмечено перераспределение представленности классов упавших древесных горючих материалов в сторону более крупных классов диаметров. За исследуемый период (2014–2018 гг.) наибольшее накопление запаса лесных горючих материалов отмечено при выжиганиях с периодичностью в 3 года (68.2 т га^{-1}).

Ключевые слова: экспериментальные выжигания, периодичность, лесные пожары, лесные горючие материалы, проводники горения, подстилка, опад.

DOI: 10.31857/S0024114824020078 EDN: REKCVQ

Пожары являются одним из основных природных факторов бореальной лесной зоны, определяющим облик современной растительности (Goldammer, Furgayev, 1996). В среднем площадь пожаров в бореальных лесах составляет от 5 до 20 млн. га в год (Conard, Ivanova, 1999; French et al., 2000; Kasischke, Bruhwiler, 2003; Stocks et al., 2003; Zhang et al., 2003; Sukhinin et al., 2004; Бондур и др., 2016; Лупян и др., 2017; Пономарев и др., 2017). Пожары воздействуют на все компоненты лесной экосистемы, изменяя ее структуру и видовой состав (Franklin et al., 2002; Angelstam, Kuuluvainen, 2004; Marozas et al., 2007; Parro et al., 2009; Berglund, Kuuluvainen, 2021), свойства почвы (Дымов и др., 2014; Dymov et al., 2021), почвенную биоту (Moretti et al.,

2006; Malmström et al., 2009; Pressler et al., 2019; Silva et al., 2020; Certini et al., 2021).

Для возникновения природных пожаров необходимо наличие растительных горючих материалов, благоприятных метеорологических условий и источника возгорания (Курбатский, 1970; Pausas, Keeley, 2009; Ryan et al., 2013). Скорость накопления горючих материалов зависит от лесорастительных условий и типа растительности (Иванова, Иванов, 2020). Распространение и интенсивность пожаров в разных ландшафтах связано с физическими и химическими характеристиками горючих материалов, влажность горючих материалов и их целостность являются важными показателями (Ryan et al., 2013). Структура и фракционный состав лесных горючих материалов определяют условия возникновения и распространения пожаров (Курбатский, 1970; Цветков, 2001; Валендик и др.,

¹Работа выполнена в рамках государственного задания (№ FWES-2021-0010).

2011; Иванова и др., 2014; Kukavskay et al., 2014; Фурьев и др., 2015; Ivanova et al., 2020).

Применение контролируемого огня широко используется за рубежом для различных целей лесного хозяйства (Brown et al., 1991; Payette, 1992; Pietikäinen, Fritze, 1995; Neary et al., 1999; Ferreira et al., 2005; Bird et al., 2008; Knapp et al., 2011). Исследования, проведенные в сосновых и смешанных лесах, подтверждают эффективность применения контролируемого огня для снижения силы пожаров и природной пожарной опасности (Kauffman, Martin, 1989; Van Wagtendonk, 1996; Burrows et al., 2000; Miller, Urban, 2000; Finney et al., 2005; Knapp et al., 2005). Использование контролируемых выжиганий приводит к снижению интенсивности лесных пожаров за счет снижения запасов горючих материалов, в частности проводников горения, которые определяют распространение огня (Rothermel, 1972). Для некоторых типов растительности использование контролируемых выжиганий может быть недейственным методом, так как восстановление запасов горючих материалов происходит за короткий срок (Fensham, 1992). Динамика накопления горючих материалов после контролируемых выжиганий зависит от ряда факторов: от количества несгоревшего горючего материала, свежего опада (превращение живой растительности в мертвое вещество), состава растительного покрова (инвазия травянистых видов), снижения скорости разложения после пожара.

Работы по проведению контролируемых выжиганий в России немногочисленны (Фурьев, 1966; Матвеев, 1995; Валендик и др., 2011; Иванова и др., 2022; McRae et al., 2006; Prescribed burning..., 2013). Основными целями контролируемых выжиганий являлись снижение пожарной опасности, содействие естественному возобновлению, уничтожение порубочных остатков, борьба с энтомофитами и т.д. Динамика запасов лесных горючих материалов в зависимости от периодичности лесных пожаров в данных работах не рассматривалась. Знания о динамике горючих материалов необходимы для определения интервала повторного возгорания, а также прогнозирования силы пожара. Цель исследований — оценка влияния периодичности выжиганий на изменение структуры и динамику накопления лесных горючих материалов (ЛГМ) в средневозрастных сосняках Красноярской лесостепи.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследования проведены в средневозрастных сосняках разнотравно-зеленомошных (56°22' с.ш., 92°57' в.д.) в лесостепной зоне Красноярского края. Климат района резко континентальный, средняя годовая температура воздуха — 0.5°C. Продолжительность вегетационного периода — 150 дней.

Среднегодовое количество осадков — 400 мм. Абсолютные высоты района исследований колеблются в пределах 250–300 м (Агроклиматический справочник ..., 1961; Справочник по климату СССР, 1967).

В 2014–2018 гг. в ранневесенний период проведены контролируемые выжигания разной периодичности на 4 пробных площадях (ПП) (по 0.03 га каждая). Сосняки разнотравно-зеленомошные длительного периода времени (>60 лет) не подвергались воздействию пожаров. На ПП 1 проведено однократное выжигание (2014 г.), на ПП 2 — два выжигания с периодичностью в три года (2014 и 2017 гг.), на ПП 3 — три выжигания с периодичностью в два года (2014, 2016, 2018 гг.), на ПП 4 — пять ежегодных выжиганий (2014, 2015, 2016, 2017 и 2018 гг.).

Выжигания проводили весной при благоприятных погодных условиях (низкая влажность, высокая положительная температура воздуха более 5 дней и отсутствие осадков в этот период времени) (табл.). Для успешного распространения горения по площади зажигание проводили от минерализованной полосы по направлению преобладающего ветра. При выжиганиях в течение 5 лет вся площадь на ПП 1–3 подвергалась огневому воздействию. В 2015 и 2017 гг. на ПП 4 отмечено мозаичное выгорание площади из-за недостаточного запаса лесных горючих материалов и неравномерного их распределения на площади.

Пробные площади друг от друга были разделены минерализованными полосами. Средние таксационные показатели сосновых ценозов на каждой ПП до выжиганий имели близкие характеристики: средняя высота деревьев изменялась от 19.6 до 20.1 м, средний диаметр составлял 16.7–19.2 см, запас стволовой древесины — 470.0–506.7 м³/га. Класс бонитета — I, полнота — 1.1–1.3.

Напочвенные лесные горючие материалы (ЛГМ) отбирали на 15 учетных площадках размером 20 × 25 см по методике Н.П. Курбатского (1970). Хвоя, шишки и древесная кора составляли опад. У травяно-кустарничкового и мохового покрова срезали зеленую часть. Подстилку отбирали до минерального горизонта. Запасы опада, мхов и подстилки составляли запасы проводников горения. Подрост на ПП был представлен единичными особями сосны, поэтому в отдельную группу ЛГМ не выделялся. Запасы упавших древесных горючих материалов диаметром до 7.0 см (УДГМ) определяли методом пересеченных линий до и после проведения выжиганий (Van Wagner, 1968; McRae et al., 1979). Валеж (крупные древесные остатки диаметром более 7.0 см) на ПП отсутствовал. В лабораторных условиях образцы ЛГМ высушивали до абсолютно-сухого состояния при температуре 100°–105°C.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На ПП 1 в 2014 г. проведено однократное выжигание. В результате смоделирован низовой пожар средней силы (табл.). Допожарный запас ЛГМ насчитывал 28.2 т га^{-1} , доля подстилки составила 85% ($24.0 \pm 2.71 \text{ т га}^{-1}$) (рис. 1). Запас опада был равен $2.6 \pm 0.43 \text{ т га}^{-1}$, запас живого напочвенного покрова (ЖНП) и УДГМ составил 0.9 ± 0.14 и $0.7 \pm 0.05 \text{ т га}^{-1}$ соответственно. В структуре опада преобладала хвоя (45%), на шишки и кору приходилось 24 и 26% соответственно. В общем запасе УДГМ преобладал 1 класс диаметров веточек размером 0.1–0.49 см (62%), на 2-й класс (0.5–0.99 см) приходилось 33%. Наиболее крупные УДГМ (1.0–2.99 см) равны 4.7% (3-й класс). УДГМ 4-го (3.0–4.99 см) и 5-го (5.0–6.99 см) классов диаметров отсутствовали. На запас проводников горения (подстилка, мхи и опад) приходилось 27.3 т га^{-1} .

После однократного выжигания средней силы на ПП 1 (через 5 лет) общий запас ЛГМ увеличился на 13.4% и составил 32.5 т га^{-1} . Основная доля в общем запасе ЛГМ приходилась на подстилку (84.1% или $27.4 \pm 2.05 \text{ т га}^{-1}$). Запас опада составил $3.0 \pm 0.64 \text{ т га}^{-1}$, изменилась его структура. Наибольшие значения приходились на хвою (45%) и шишки (35%). Доля УДГМ в общем запасе ЛГМ существенно не изменилась (5.7%), но увеличилась в абсолютном выражении в 2.7 раза ($1.9 \pm 0.18 \text{ т га}^{-1}$) за счет представленности 3-го класса диаметра УДГМ (63% от запаса УДГМ) и уменьшения вклада 1-го и 2-го классов диаметров до 17 и 21% соответственно. Запас проводников горения увеличился на 10% и составил 30.4 т га^{-1} . Таким образом, через 5 лет после однократного выжигания на ПП 1 наблюдалось незначительное увеличение общего запаса ЛГМ.

В течение 5 лет на ПП 2 проведено 2 контролируемых выжигания (2014 и 2017 гг.) с периодичностью в 3 года. Допожарный общий запас ЛГМ был равен 32.3 т га^{-1} (рис. 2). На лесную подстилку приходилось $27.4 \pm 5.86 \text{ т га}^{-1}$ (85% от общего запаса). Запас опада насчитывал $2.9 \pm 0.72 \text{ т га}^{-1}$, где основной вклад принадлежал хвое (38%) и шишкам (45%). Травяная ветошь и древесная кора составляли 3 и 14% соответственно. Запас ЖНП был равен 3.9% ($1.3 \pm 0.34 \text{ т га}^{-1}$). На запас УДГМ

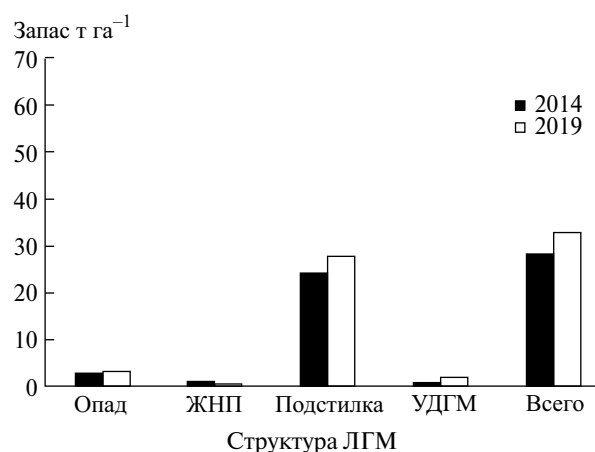


Рис. 1. Динамика ЛГМ при однократном выжигании (ПП 1).

приходилось $0.7 \pm 0.09 \text{ т га}^{-1}$ с наибольшей долей 1-го (56%) и 2-го классов диаметров (25%). УДГМ 3-го класса составили 19%. На запас проводников горения приходилось 31.5 т га^{-1} .

В результате выжигания в 2014 г. на ПП 2 развился пожар средней силы, огнем было пройдено 100% пробной площади. Через 3 года после выжигания общий запас ЛГМ увеличился в 2.1 раза, по сравнению с исходным показателем, и составил 68.2 т га^{-1} за счет увеличения запаса подстилки до $60.0 \pm 8.25 \text{ т га}^{-1}$ (88% от общего запаса ЛГМ). Запас опада увеличился с 2.9 ± 0.72 до $4.7 \pm 0.58 \text{ т га}^{-1}$. Так же, как и до пожара, основная доля в структуре опада приходилась на шишки (53%) и хвою (28%). Запас коры и травяной ветоши установлен 16 и 3% соответственно. По сравнению с допожарным значением запас ЖНП снизился в 22.2 раза и стал равен $0.06 \pm 0.01 \text{ т га}^{-1}$. Запас УДГМ составил $3.5 \pm 0.28 \text{ т га}^{-1}$, что превысило допожарное значение в 4.9 раза. При пожаре средней силы УДГМ 1-го и 2-го классов диаметров полностью сгорели. Основной вклад в запас УДГМ принадлежал 3 классу диаметров (57%). Запас проводников горения составил 64.8 т га^{-1} . Высокий запас проводников горения может привести к возникновению естественного пожара с устойчивым и интенсивным горением, что послужит причиной гибели

Таблица. Характеристики экспериментальных выжиганий и погодные условия

Характеристики экспериментальных пожаров	Год проведения выжиганий				
	2014	2015	2016	2017	2018
Высота пламени, м	1.3	0.2	0.5	0.5–1.0	0.5
Скорость распространения, м/мин.	1.8	0.4	0.3	0.9	0.2
Влажность воздуха, %	22.0	35.5	28.1	24.2	40.0
Температура воздуха, °С	28.0	23.5	19.2	26.8	23.0
Скорость ветра, м/сек.	2.9	1.0	1.0	1.0	2.0
Глубина прогорания подстилки, см	3.0 ± 0.20	0.1 ± 0.02	0.2 ± 0.03	0.9 ± 0.86	0.7 ± 0.12

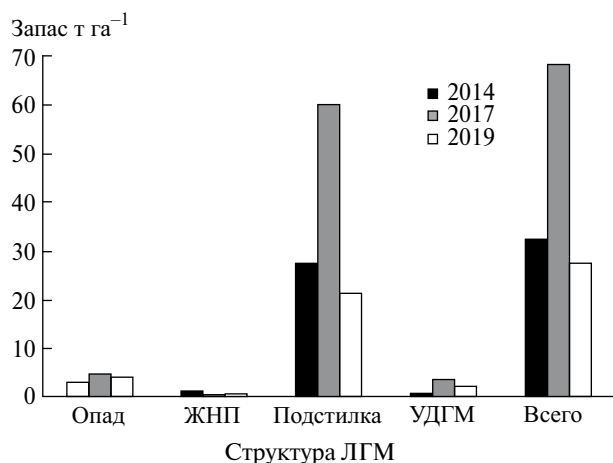


Рис. 2. Динамика ЛГМ после двукратного выжигания (ПП 2).

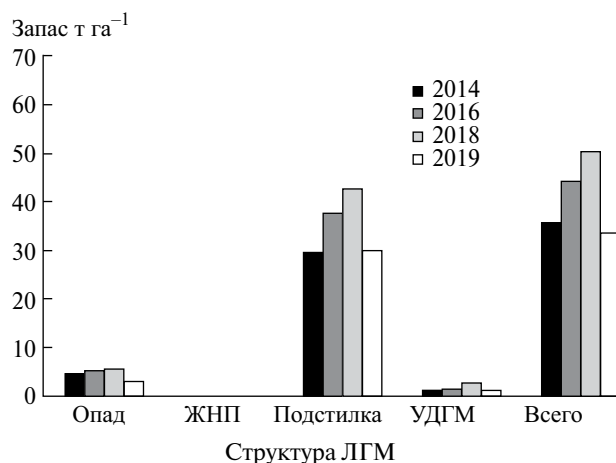


Рис. 3. Динамика ЛГМ после трехкратного выжигания (ПП 3).

древостоя. Следовательно, необходимо применение повторных выжиганий, которые будут способствовать снижению общего запаса ЛГМ.

В результате экспериментального выжигания в 2017 г. на ПП 2 развился пожар слабой силы. Запас ЛГМ через 2 года после проведения выжигания снизился до 27.5 т га^{-1} , что на 15% меньше допозарного показателя и в 2.6 раза ниже, чем после выжигания в 2014 г. Запас подстилки снизился ($21.2 \pm 8.91 \text{ т га}^{-1}$) и составил 77% от общего запаса. Лесной опад насчитывал $4.0 \pm 0.50 \text{ т га}^{-1}$. Структура опада изменилась: увеличилась доля хвои до 46% (в 2 раза), доля шишек уменьшилась до 39%. На долю травяной ветоши и коры приходилось 1.5 и 13% соответственно. Запас ЖНП составил $0.2 \pm 0.04 \text{ т га}^{-1}$. Запас УДГМ уменьшился до $2.1 \pm 0.26 \text{ т га}^{-1}$, где основной вклад приходился на 3 класс (70%). Это объясняется тем, что более мелкие классы диаметров УДГМ сгорают полностью, а обугленные фракции переходят в лесную подстилку. Вклад 1-го и 2-го классов УДГМ уменьшился до 12 и 18% соответственно. Таким образом, запас проводников горения после второго выжигания снизился на 20% от допозарного значения и составил 25.2 т га^{-1} . Двукратное выжигание с периодичностью в 3 года привело к уменьшению общего запаса ЛГМ и проводников горения по сравнению с допозарными показателями.

За 5 лет на ПП 3 проведено 3 выжигания (2014, 2016 и 2018 гг.) с периодичностью в 2 года. Допозарный общий запас ЛГМ был равен 35.7 т га^{-1} (рис. 3). Доля лесной подстилки составила 83% от общего запаса ЛГМ (или $29.6 \pm 3.73 \text{ т га}^{-1}$). На опад приходилось $4.6 \pm 1.01 \text{ т га}^{-1}$, где основной вклад принадлежал коре (24%) и хвое (66%). Доля травяной ветоши и шишек незначительна — 3 и 7%. Запас ЖНП составил $0.5 \pm 0.02 \text{ т га}^{-1}$, запас УДГМ — $1.1 \pm 0.21 \text{ т га}^{-1}$ с близкими значениями между классами: 1-й класс — 36, 2-й класс — 28 и 3-й

класс — 36%. На проводники горения приходилось 34.5 т га^{-1} .

Общий запас ЛГМ через 2 года после проведения экспериментального выжигания 2014 г. средней силы увеличился на 19% и стал равен 44.0 т га^{-1} . Доля запаса подстилки составила 85% (или 37.6 т га^{-1}), что превысило допозарный показатель. Запас опада увеличился на 11% и достиг $5.2 \pm 0.79 \text{ т га}^{-1}$. В структуре опада изменилось соотношение фракций. Снизилась доля хвои до 41%, увеличилась в 6 раз доля шишек (41%). На ветошь и кору приходилось 0.6 и 17% соответственно. Фитомасса ЖНП составила $0.09 \pm 0.01 \text{ т га}^{-1}$. Запас УДГМ увеличился незначительно, до $1.3 \pm 0.16 \text{ т га}^{-1}$. После пожара уменьшилась доля первых двух классов диаметров (18 и 20% соответственно) и увеличилась доля УДГМ 3-го класса (1.0–2.99 см) до 63%. Запас проводников горения превысил допозарное значение и составил 42.7 т га^{-1} , главным образом за счет увеличения запаса подстилки и опада.

Наибольший запас ЛГМ (50.3 т га^{-1}) на ПП 3 установлен через 2 года после второго выжигания слабой силы. Фитомасса подстилки достигла своего максимального значения $42.5 \pm 2.93 \text{ т га}^{-1}$ (84%) от общего запаса ЛГМ. Фитомасса опада составила $5.3 \pm 1.03 \text{ т га}^{-1}$. В его структуре наибольшая доля (48%) приходилась на хвою. Доля шишек в опаде снизилась до 30%. Запас ветоши и коры существенно не изменился (0.3 и 21.7% соответственно). Фитомасса ЖНП составила $0.04 \pm 0.01 \text{ т га}^{-1}$. Запас УДГМ после 2-го выжигания увеличился на 48% и достиг $2.5 \pm 0.35 \text{ т га}^{-1}$. В структуре УДГМ наибольшая доля принадлежала 3-му классу диаметров (67%), доля ветвей 1-го (16%) и 2-го классов (18%) снизилась. Запас проводников горения увеличился на 11% и составил 47.7 т га^{-1} . Таким образом, через 2 года после 2-го выжигания отмечено наибольшее значение запаса ЛГМ (50.3 т га^{-1}). Это объясняется тем, что после первых 2-х выжиганий наблюдалось увеличение запасов опада и УДГМ в межпозарные

интервалы, которые не сгорали полностью при выжиганиях, а недогоревшая часть (обуглившаяся) переходила в лесную подстилку.

На следующий год после 3-го выжигания слабой силы (2018 г.) на ПП 3 общий запас ЛГМ уменьшился на 33% (33.6 т га^{-1}). Доля подстилки составила 89% ($29.9 \pm 1.88 \text{ т га}^{-1}$). Запас опада снизился и стал равен $2.8 \pm 0.77 \text{ т га}^{-1}$. Наибольший вклад в опад внесли хвоя (39%) и шишки (44%). На долю травяной ветоши и коры приходилось 0.4 и 16% соответственно. Запас ЖНП составил $0.16 \pm 0.05 \text{ т га}^{-1}$. Отмечены наименьшие значения УДГМ ($0.8 \pm 0.15 \text{ т га}^{-1}$) за исследуемый период. Основная доля УДГМ (55%) приходилась на 3-й класс диаметров. Доля запаса первых двух классов диаметров составила 19 и 26% соответственно. В результате 3 выжиганий запас проводников горения уменьшился на 1.8 т га^{-1} , по сравнению с допожарным значением, и стал равен 32.7 т га^{-1} . Таким образом, общий запас ЛГМ и проводников горения снизился до первоначального состояния после трех пожаров (при периодичности выжиганий в 2 года).

За 5 лет (2014–2018 гг.) на ПП 4 проведено пять ежегодных выжиганий, при которых в 2015 и 2017 гг. пожары характеризовались беглым, низкоинтенсивным горением, с мозаичным выгоранием (60–70%) травяно-кустарничкового яруса и лесной подстилки. Это связано с недостаточным запасом проводников горения, которые накапливаются в течение года, и неравномерным их размещением по площади. Допожарный запас ЛГМ на ПП 4 насчитывал 21.5 т га^{-1} (рис. 4) с долей участия подстилки 80% ($17.2 \pm 0.50 \text{ т га}^{-1}$). Запас опада был равен $2.9 \pm 0.77 \text{ т га}^{-1}$ с преобладанием хвои (51%). Запасы шишек и коры имели близкие значения (22 и 23% соответственно). Доля травяной ветоши составляла 4.7% от запаса опада. Запас ЖНП характеризовался низкими значениями $0.6 \pm 0.15 \text{ т га}^{-1}$. Запас УДГМ достигал $0.8 \pm 0.07 \text{ т га}^{-1}$ с преобладанием 1 класса (48%). Доля 2-го класса составляла

28%, доля 3-го — 24% соответственно. На запас проводников горения приходилось 20.5 т га^{-1} .

На следующий год после первого выжигания (пожар средней силы) запас ЛГМ на ПП 4 увеличился на 45% (39.2 т га^{-1}). Доля подстилки составила 88% ($34.4 \pm 3.61 \text{ т га}^{-1}$) от общего запаса. Запас опада увеличился и стал равен $3.5 \pm 0.20 \text{ т га}^{-1}$. Основную часть опада составляли шишки (52%). Доля хвои уменьшилась до 31%. Запас ветоши и коры установлен 1 и 16% соответственно. На запас ЖНП приходилось $0.13 \pm 0.04 \text{ т га}^{-1}$. Запас УДГМ увеличился до $1.2 \pm 0.15 \text{ т га}^{-1}$ с преобладанием 3-го класса (67%). Вклад 1-го (19%) и 2-го (15%) классов значительно сократился. Запас проводников горения достиг 37.9 т га^{-1} (увеличился в 1.9 раза).

Общий запас ЛГМ после 2-го выжигания (пожар слабой силы) на ПП 4 достиг 55.8 т га^{-1} , что значительно превысило его предыдущие значения. Доля запаса подстилки составила 90% ($50.5 \pm 6.97 \text{ т га}^{-1}$). На опад приходилось $4.2 \pm 1.36 \text{ т га}^{-1}$ с наибольшей долей шишек (39%) и хвои (42%). Доля травяной ветоши и коры составляла 0.9 и 18%. Фитомасса ЖНП имела низкие значения $0.05 \pm 0.01 \text{ т га}^{-1}$. Запас УДГМ сократился до $1.09 \pm 0.20 \text{ т га}^{-1}$. На 3-й класс диаметров ветвей пришлось 58%. Доля 1-го и 2-го классов диаметров ветвей установлена 20 и 23% соответственно. Запас проводников горения после второго выжигания равен 54.7 т га^{-1} .

После проведения 3-го выжигания слабой силы отмечено наибольшее значение общего запаса ЛГМ (65.4 т га^{-1}). Доля подстилки в общем запase увеличилась до 92%. На опад пришлось $3.0 \pm 0.92 \text{ т га}^{-1}$, где наибольший вклад принадлежал запасу шишек (35%) и хвои (40%). Запас коры (25%) и ветоши (0.5%) существенно не изменился. Установлено минимальное значение фитомассы ЖНП за исследуемый период — $0.01 \pm 0.01 \text{ т га}^{-1}$, что связано с деградацией живого напочвенного покрова в результате ежегодного влияния пирогенного фактора. Запас УДГМ составил $2.2 \pm 0.24 \text{ т га}^{-1}$. Половина запаса УДГМ (50%) приходилась на 3-й класс диаметров (1.0–2.99 см). Первые два класса диаметров имели близкие значения (1 класс — 24 и 2–26%). Запас проводников горения превысил допожарное значение в 3.1 раза и достиг 63.2 т га^{-1} . После трех ежегодных пожаров общий запас ЛГМ имел тенденцию к накоплению, в связи с чем потенциальная горимость соснового фитоценоза возросла.

После 4-го выжигания средней силы на ПП 4 общий запас ЛГМ снизился на 31% и составил 44.8 т га^{-1} . Запас подстилки был равен 88% от общего запаса ЛГМ. Запас опада сократился по сравнению с предыдущим показателем до $2.8 \pm 0.71 \text{ т га}^{-1}$. В структуре опада отмечено перераспределение фракций. Доля хвои увеличилась в 1.5 раза (60%), доля шишек уменьшилась до 28%. Запас ветоши и коры стал равен 0.3 и 12% соответственно. Запас ЖНП составил $0.3 \pm 0.04 \text{ т га}^{-1}$.

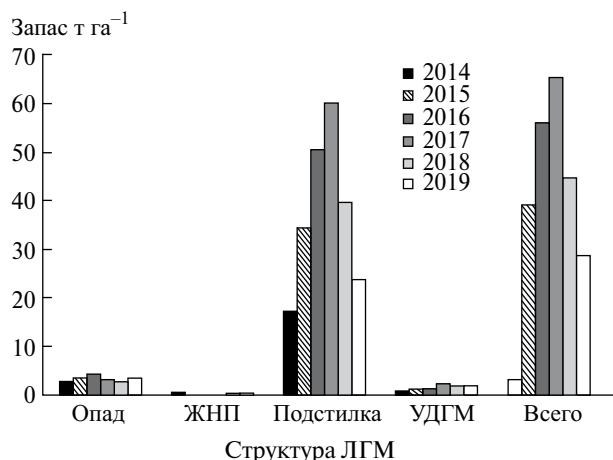


Рис. 4. Динамика ЛГМ после пятикратного ежегодного выжигания (ПП 4).

Запас УДГМ уменьшился до 1.7 ± 0.29 т га⁻¹ за счет сгорания УДГМ 1-го и 2-го классов, где их доля составила 14 и 13.5% соответственно. В структуре запаса УДГМ увеличилась доля 3 класса диаметров (72%). Запас проводников горения на ПП 4 после четвертого выжигания уменьшился на 33% и стал равен 42.4 т га⁻¹, что превысило допожарное значение более чем в 2 раза.

После 5-го выжигания слабой силы общий запас ЛГМ составил 29.0 т га⁻¹. Запас подстилки насчитывал 23.7 ± 1.32 т га⁻¹ (82% от общего запаса ЛГМ). Запас опада увеличился до 3.5 ± 0.98 т га⁻¹, где основная доля приходится на шишки (27%) и хвою (57%). Запас травяной ветоши и коры составил 0.2 и 16% соответственно. Фитомасса ЖНП имела низкие значения (0.08 ± 0.01 т га⁻¹). На запас УДГМ приходилось 1.8 ± 0.17 т га⁻¹, где основная доля (70%) соответствовала УДГМ 3-го класса диаметров. На УДГМ 1-го и 2-го классов приходилось 10 и 19% соответственно. После пятого выжигания запас проводников горения уменьшается до 27.2 т га⁻¹.

Таким образом, после проведения трех ежегодных выжиганий отмечено наибольшее значение запаса проводников горения (63.2 т га⁻¹) за весь период наблюдений, в результате двух последующих выжиганий данный показатель снизился до исходного (допожарного) значения.

ВЫВОДЫ

1. При проведении однократного выжигания на 5-й год исследований общий запас лесных горючих материалов увеличился на 13.4%. Запас проводников горения увеличился на 10.3%, по сравнению с допожарным значением, и составил 30.4 т га⁻¹.
2. При периодичности выжиганий в 3 года наблюдалось увеличение общего запаса лесных горючих материалов в 2.1 раза (68.2 т га⁻¹) на третий год наблюдений после первого выжигания. После 2-го выжигания общий запас лесных горючих материалов снизился до 27.5 т га⁻¹. Запас проводников горения составил 25.2 т га⁻¹.
3. После выжиганий с периодичностью в 2 года общий запас лесных горючих материалов увеличился после 2-го выжигания и достиг 50.3 т га⁻¹, что на 29% больше допожарного значения. После третьего огневого воздействия общий запас лесных горючих материалов снизился до 32.7 т га⁻¹, что ниже допожарного показателя.
4. При ежегодных выжиганиях на третий год отмечен наибольший запас лесных горючих материалов (65.4 т га⁻¹), запас проводников горения достиг критического показателя и составил 63.2 т га⁻¹. После последующих выжиганий (на 5-й год) отмечено снижение общего запаса лесных горючих материалов до 29.0 т га⁻¹.

5. Периодичность пожаров оказала существенное влияние на динамику запаса лесных горючих материалов и его структуру. Применение выжиганий с разной периодичностью позволяет регулировать запасы лесных горючих материалов, а также снизить возросшую потенциальную горимость насаждений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агроклиматический справочник по Красноярскому краю и Тувинской АО. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 268 с.
- Бондур В.Г., Гордо К.А., Кладов В.Л. Пространственно-временные распределения площадей природных пожаров и эмиссий углеродсодержащих газов и аэрозолей на территории Северной Евразии по данным космического мониторинга // Исследование Земли из космоса. 2016. № 6. С. 3–20.
- Валендик Э.Н., Верховец С.В., Кисляхов Е.К., Иванова Г.А., Брюханов А.В., Косов И.В., Голдаммер Й. Технологии контролируемых выжиганий в лесах Сибири. Красноярск: Сибирский фед. университет, 2011. 160 с.
- Дымов А.А., Дубровский Ю.А., Габов Д.Н. Пирогенные изменения подзолов иллювиально-железистых (средняя тайга, Республика Коми) // Почвоведение. 2014. № 2. С. 144–154.
- Иванова Г.А., Иванов В.А. Зональность лесных горючих материалов и их пирогенная трансформация в сосняках Средней Сибири // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2020. № 4 (376). С. 9–26.
- Иванова Г.А., Конрад С.Г., Макрае Д.Д., Безкоровайная И.Н., Богородская А.В., Жила С.В., Иванов В.А., Иванов А.В., Ковалева Н.М., Краснощекова Е.Н., Кукавская Е.А., Орешков Д.Н., Перевозникова В.Д., Самсонов Ю.Н., Сорокин Н.Д., Тарасов П.А., Цветков П.А., Шишкин А.С. Воздействие пожаров на компоненты экосистемы среднетаежных сосняков Сибири. Новосибирск: Наука, 2014. 232 с.
- Иванова Г.А., Кукавская Е.А., Безкоровайная И.Н., Богородская А.В., Жила С.В., Иванов В.А., Ковалева Н.М., Краснощекова Е.Н., Тарасов П.А. Воздействие пожаров на светлехвойные леса Нижнего Приангарья. Новосибирск: Наука, 2022. 204 с.
- Курбатский Н.П. Исследование количества и свойств горючих материалов // Вопросы лесной пирологии. Красноярск: ИЛИД СО АН СССР, 1970. С. 5–58.
- Лузян Е.А., Барталев С.А., Балашов И.Б., Егоров Б.А., Ершов Д.Б., Кобец Д.А., Сенько К.С., Стыценко Ф.Б., Сычугов И.Г. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в 21 веке на территории российской федерации (цифры и факты по данным детектирования активного горения) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 158–175.
- Матвеев П.М. Влияние лесовозобновительных выжиганий на средоформирующие функции северотаежных лиственничников Восточной Сибири // Информационный листок. М.: ВНИЦлесресурс, 1995. С. 60–61.
- Пономарев Е.И., Швецов Е.Г., Усатая Ю.О. Регистрация энергетических характеристик пожаров в лесах Сибири дистанционными средствами // Исследование Земли из космоса. 2017. № 4. С. 3–11.

- Справочник по климату СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1967. Вып. 21. Ч. II. 504 с.
- Фуряев В.В. Шелкопрядники тайги и их выжигание. М.: Наука, 1966. 92 с.
- Фуряев В.В., Самсоненко С.Д., Фуряев И.В. Пирологическая характеристика комплексов напочвенных горючих материалов в доминирующих типах леса Верхне-Обского массива (юго-восток Западной Сибири) // Лесное хозяйство. 2015. № 1. С. 36–37.
- Цветков П.А. Запасы горючих материалов в лесах северо-востока Эвенкии // Лесное хозяйство. 2001. № 4. С. 33–35.
- Angelstam P., Kuuluvainen T. Boreal forest disturbance regimes, successional dynamics and landscape structures: A European perspective // Ecological Bulletins. 2004. V. 51. P. 117–136.
- Berglund H., Kuuluvainen T. Representative boreal forest habitats in northern Europe, and a revised model for ecosystem management and biodiversity conservation // Ambio. 2021. V. 50. P. 1003–1017.
- Bird R.B., Bird W.D., Codding B.F., Parker C.H., Jones J.H. The 'fire stick farming' hypothesis: Australian Aboriginal foraging strategies, biodiversity, and anthropogenic fire mosaics // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2008. V. 105. P. 796–801.
- Brown J.K., Reinhardt E.D., Fischer W.C. Predicting duff and woody fuel consumption in Northern Idaho prescribed fires // Forest Science. 1991. V. 37. № 6. P. 1550–1566.
- Burrows N.D., Ward B., Robinson A.D. Behaviour and some impacts of a large wildfire in the Gnaragar maritime pine (*Pinus pinaster*) plantation, Western Australia // CALM Science. 2000. V. 3. P. 251–260.
- Certini G., Moya D., Lucas-Borja M., Mastrolonardo G. The impact of fire on soil-dwelling biota: A review // Forest Ecology and Management. 2021. V. 488. P. 118989.
- 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. 1999. V. 98. № 3. P. 305–313.
- Dymov A.A., Startsev V.V., Milanovsky E.Y., Valdes-Korovkin I.A., Farkhodov Y.R., Yudina A.V., Donnerhack O., Gugenberger G. Soils and soil organic matter transformations during the two years after a low-intensity surface fire (subpolar Ural, Russia) // Geoderma. 2021. V. 404. P. 115278.
- Fensham R.J. The management implications of fine fuel dynamics in bushlands surrounding Hobart, Tasmania // Journal of Environmental Management. 1992. V. 36. P. 301–320.
- Ferreira A.J.D., Coelho C.O. A., Boulet A.K., Leighton-Boyce G., Keizer J.J., Ritsema C.J. Influence of burning intensity on water repellency and hydrological processes at forest and shrub sites in Portugal // Australian Journal of Soil Research. 2005. V. 43. P. 327–336.
- Finney M.A., McHugh C.W., Genfell I.C. Stand- and landscape-level effects of prescribed burning on two Arizona wildfires // Canadian Journal of Forest Research. 2005. V. 35. P. 1714–1722.
- Franklin J.F., Spies T.A., Pelt R.V., Carey A.B., Thornburgh D.A., Berg D.R., Lindenmayer D.B., Harmon M.E., Keeton W.S., Shaw D.C., Bible K., Chen J. Disturbances and structural development of natural forest ecosystems with silvicultural implications, using Douglas-fir forests as an example // Forest Ecology and Management. 2002. V. 155. № 1–3. P. 399–423.
- French N.F.H., Kasischke E.S., Stocks B.J., Mudd J.P., Martell D.L., Lee B.S. Carbon release from fires in North American boreal forests // Fire, Climate Change, and Carbon Cycling in the Boreal Forest. Springer-Verlag, New York, 2000. P. 377–388.
- Goldammer J.G., Fureyev, V.V. Fire in ecosystems of boreal Eurasia. Dordrecht: Springer, Netherlands, 1996. 528 p.
- Ivanova G.A., Kukavskaya E.A., Ivanov V.A., Conard S.G., McRae D.J. Fuel characteristics, loads and consumption in Scots pine forests of central Siberia // Journal of Forestry Research. 2020. V. 31. № 6. P. 2507–2524.
- Kasischke E.S., Bruhwiler L.M. Emissions of carbon dioxide, carbon monoxide and methane from boreal forest fires in 1998 // Journal of Geophysical Research. 2003. V. 108. P. 2–16.
- Kauffman J.B., Martin R.E. Fire behavior, fuel consumption, and forest-floor changes following prescribed understory fires in Sierra Nevada mixed conifer forests // Canadian Journal of Forest Research. 1989. V. 19. P. 455–462.
- Knapp E.E., Keeley J.E., Ballenger E.A., Brennan T.J. Fuel reduction and coarse woody debris dynamics with early and late season prescribed fire in a Sierra Nevada mixed conifer forest // Forest Ecology and Management. 2005. V. 208. № 1–3. P. 383–397.
- Knapp E.E., Varner J.M., Busse M.D., Skinner C.N., Shestak C.A. Behaviour and effects of prescribed fire in masticated fuelbeds // International Journal of Wildland Fire. 2011. V. 20. № 8. P. 932–945.
- Kukavskaya E.A., Ivanova G.A., Conard S.G., McRae D.J., Ivanov V.A. Biomass dynamics of central Siberian Scots pine forests following surface fires of varying severity // International Journal of Wildland Fire. 2014. V. 23. № 6. P. 872–886.
- Malmström A., Persson T., Ahlström K., Gongalsky K.B., Bengtsson J. Dynamics of soil meso- and macrofauna during a 5-year period after clear-cut burning in a boreal forest // Applied Soil Ecology. 2009. V. 43. № 1. P. 61–74.
- Marozas V., Racinskas J., Bartkevicius E. Dynamics of ground vegetation after surface fires in hemiboreal *Pinus sylvestris* forests // Forest Ecology and Management. 2007. V. 250. № 1–2. P. 47–55.
- McRae D.J., Conard S.G., Ivanova G.A., Sukhinin A.I., Baker S.P., Samsonov Y.N., Blake T.W., Ivanov V.A., Ivanov A.V., Churkina T.V., Hao W.M., Koutzenogij K.P., Kovaleva N.M. Variability of fire behavior, fire effects, and emissions in Scotch pine forests of Central Siberia // Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. 2006. V. 11. № 1. P. 45–74.
- McRae D.J., Alexander M.E., Stocks B.J. Measurement of fuels and fire behavior on prescribed burns // Canadian Forestry Service, Great Lakes Forest Research Centre, Sault Ste. Marie, ON. Information Report O-X-287. 1979. 44 p.
- Miller C., Urban D.L. Modeling the effects of fire management alternatives on Sierra Nevada mixed-conifer forests // Ecological Applications. 2000. V. 10. № 1. P. 85–94.
- Moretti M., Duelli P., Obrist M.K. Biodiversity and resilience of arthropod communities after fire disturbance in temperate forests // Oecologia. 2006. V. 149. P. 312–327.
- Neary D.G., Klopatek C.C., DeBano L.F., Ffolliott P.F. Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis // Forest Ecology and Management. 1999. V. 122. P. 51–71.

- Parro K., Köster K., Jögiste K., Vodde F. Vegetation dynamics in a fire damaged forest area: the response of major ground vegetation species // *Baltic Forestry*. 2009. V. 15. № 2. P. 206–215.
- Pausas J.G., Keeley J.E. A burning story: the role of fire in the history of life // *Bioscience*. 2009. № 59. P. 593–601.
- Payette S. Fire as a controlling process in the North American boreal forest // *A Systems Analysis of the Global Boreal Forest*. Cambridge University Press, 1992. P. 144–169.
- Pietikäinen J., Fritze H. Clear-cutting and prescribed burning in coniferous forest: comparison of effects on soil fungal and total microbial biomass, respiration activity and nitrification // *Soil Biology and Biochemistry*. 1995. V. 27. № 1. P. 101–109.
- Prescribed burning in Russia and neighbouring temperate-boreal Eurasia. A publication of the Global Fire Monitoring Center (GFMC) / J.G. Goldammer (Ed.). Dordrecht: Kessel Publ. House, 2013. 326 p.
- Pressler Y., Moore J.C., Cotrufo M.F. Belowground community responses to fire: meta-analysis reveals contrasting responses of soil microorganisms and mesofauna // *Oikos*. 2019. V. 128. № 3. P. 309–327.
- Rothermel R.C. A mathematical model for fire spread predictions in wildland fires. Research Paper INT-115. Ogden, UT: US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1972. P. 40.
- Ryan K.C., Knapp E.E., Varner J.M. Prescribed fire in North American forests and woodlands: history, current practice, and challenges // *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2013. V. 11. P. 15–24.
- Silva F.D., Portella A.C.F., Giongo M. Meta-analysis of studies on the effect of fire on forest biomes in relation to fungal microorganisms // *Advances in Forestry Science*. 2020. V. 7. № 1. P. 931–938.
- Stocks B.J., Mason J.A., Todd J.B., Bosch E.M., Wotton B.M., Amiro B.D., Flannigan, M.D., Hirsch K.G., Logan K.A., Martell D.L., Skinner W.R. Large forest fires in Canada, 1959–1997 // *Journal of Geophysical Research*. 2003. V. 108. P. 1–12.
- Sukhinin A.I., French N.H.F., Kasischke E.S., Hewson J.H., Soja A.J., Csiszar I.A., Hyer E.J., Loboda T., Conrad S.G., Romasko V.I., Pavlichenko E.A., Miskiv S.I., Slinkina O.A. AVHRR-based mapping of fires in Russia: new products for fire management and carbon cycle studies // *Remote Sensing of Environment*. 2004. V. 93. № 4. P. 546–564.
- Van Wagner C.E. The line intersect method in forest fuel sampling // *Forest Science*. 1968. V. 14. № 1. P. 20–26.
- Van Wagtenonk J.W. Use of a deterministic fire growth model to test fuel treatments // *Sierra Nevada Ecosystem Project: Final report to Congress, Assessments and scientific basis for management options*. Davis: University of California, Centers for Water and Wildland Resources, 1996. V. 2. P. 1155–1165.
- Zhang Y.-H., Wooster M.J., Tutubalina O., Perry G.L.W. Monthly burned area and forest fire carbon emission estimates for the Russian Federation from SPOT VGT // *Remote Sensing of Environment*. 2003. V. 87. № 1. P. 1–15.

Influence of the Periodicity of Ground Fires in Middle-Aged Pine Forests on the Combustible Materials Stocks

R. S. Sobachkin^{1*}, N. M. Kovaleva¹

¹Forest Institute, Siberian Branch of the RAS, Akademgorodok, 50 bldg. 28, Krasnoyarsk, 660036 Russia

*E-mail: romans@ksc.krasn.ru

Significant areas of forest are annually exposed to fires in the Krasnoyarsk Territory. Fires transform forest areas and change the stocks and structure of combustible materials. Information on the dynamics of forest fuel accumulation can serve as a basis for managing the pyrogenic resistance of forest areas. The purpose of the research is to assess the impact of early spring ground fires of different frequencies on the structure and stocks of combustible materials in forests. Experimental fires were carried out in middle-aged mixed-grass-green-moss pine forests in the forest-steppe zone of the Krasnoyarsk Territory. Experimental fires were simulated with different periodicities (annual, with an interval of 2–3 years and a singular one). Regardless of periodicity, the experimental fires led to an increase of combustible materials stocks in 2–3 years after fires. Repeated burnings reduced the stocks of combustible materials close to pre-fire values. The structure of combustible materials has changed, which has led to a decrease in potential flammability of pine forests. The proportion of needles and bark in litter has decreased, and the proportion of cones has increased. Fires led to a redistribution of deadwood classes towards larger diameters. During the research period (2014–2018), the largest reserve of forest fuel loads was noted on the plot with triennial fires (68.2 t ha⁻¹).

Key words: experimental fires, frequency, forest fires, combustible materials in forests, combustion conductors, forest floor, litter.

Acknowledgements: The work has been carried out within the framework of the state contract № FWES-2021-0010.

REFERENCES

- Agroklimaticheskii spravochnik po Krasnoyarskomu krayu i Tuvinskoi avtonomnoi oblasti* (Handbook of agroclimatic features in Krasnoyarsk krai and Tuva autonomous oblast), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1961, 268 p.
- Angelstam P., Kuuluvainen T., Boreal forest disturbance regimes, successional dynamics and landscape structures: A European perspective, *Ecological Bulletins*, 2004, Vol. 51, pp. 117–136.
- Berglund H., Kuuluvainen T., Representative boreal forest habitats in northern Europe, and a revised model for ecosystem management and biodiversity conservation, *Ambio*, 2021, Vol. 50, pp. 1003–1017.
- Bird R.B., Bird W.D., Codding B.F., Parker C.H., Jones J.H., The ‘fire stick farming’ hypothesis: Australian Aboriginal foraging strategies, biodiversity, and anthropogenic fire mosaics, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, Vol. 105, pp. 796–801.
- Bondur V.G., Gordo K.A., Kladov V.L., Prostranstvenno-vremennyye raspredeleniya ploshchadei prirodnikh pozharov i emissii uglekrodosoderzhashchikh gazov i aerorozolei na territorii Severnoi Evrazii po dannym kosmicheskogo monitoringa (Spatiotemporal distributions of areas of natural fires and emissions of carbon-containing gases and aerosols on the territory of Northern Eurasia according to space monitoring data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2016, No. 6, pp. 3–20.
- Brown J.K., Reinhardt E.D., Fischer W.C., Predicting duff and woody fuel consumption in Northern Idaho prescribed fires, *Forest Science*, 1991, Vol. 37, No. 6, pp. 1550–1566.
- Burrows N.D., Ward B., Robinson A.D., Behaviour and some impacts of a large wildfire in the Gngangara maritime pine (*Pinus pinaster*) plantation, Western Australia, *CALM Science*, 2000, Vol. 3, pp. 251–260.
- Certini G., Moya D., Lucas-Borja M., Mastrodonato G., The impact of fire on soil-dwelling biota: A review, *Forest Ecology and Management*, 2021, Vol. 488, pp. 118989.
- 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*, 1999, Vol. 98, pp. 305–313.
- Dymov A.A., Startsev V.V., Milanovsky E.Y., Valdes-Korovin I. A., Farkhodov Y.R., Yudina A.V., Donnerhack O., Guggenberger G., Soils and soil organic matter transformations during the two years after a low-intensity surface fire (subpolar Ural, Russia), *Geoderma*, 2021, Vol. 404, pp. 115278.
- Dymov A.A., Dubrovskii Yu.A., Gabov D.N., Pirogennyye izmeneniya podzolov illuvial’no-zhelezistykh (srednyaya taiga, Respublika Komi) (Pyrogenic changes in illuvial-feruginous podzols (Middle taiga, Komi Republic)), *Pochvovedenie*, 2014, No. 2, pp. 144–154.
- Fensham R.J., The management implications of fine fuel dynamics in bushlands surrounding Hobart, Tasmania, *Journal of Environmental Management*, 1992, Vol. 36, pp. 301–320.
- Ferreira A.J. D., Coelho C.O. A., Boulet A.K., Leighton-Boyce G., Keizer J.J., Ritsema C.J., Influence of burning intensity on water repellency and hydrological processes at forest and shrub sites in Portugal, *Australian Journal of Soil Research*, 2005, Vol. 43, pp. 327–336.
- Finney M.A., McHugh C. W., Genfoll I.C., Stand- and landscape-level effects of prescribed burning on two Arizona wildfires, *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, Vol. 35, pp. 1714–1722.
- Franklin J.F., Spies T.A., Pelt R.V., Carey A.B., Thornburgh D. A., Berg D.R., Lindenmayer D.B., Harmon M.E., Keeton W.S., Shaw D.C., Bible K., Chen J., Disturbances and structural development of natural forest ecosystems with silvicultural implications, using Douglas-fir forests as an example, *Forest Ecology and Management*, 2002, Vol. 155, pp. 399–423.
- French N.F. H., Kasischke E.S., Stocks B.J., Mudd J.P., Martell D.L., Lee B.S., *Carbon release from fires in North American boreal forests*. In: Kasischke, E. S., Stocks, B. J. (Eds.), *Fire, Climate Change, and Carbon Cycling in the Boreal Forest*. Springer-Verlag, New York, 2000, pp. 377–388.
- Furyaev V.V., *Shelkopryadniki tajgi i ix vyzhiganiye* (Silkworms of the taiga and their burning), Moscow: Nauka, 1966, 92 p.
- Furyaev V.V., Samsonenko S.D., Furyaev I.V., Pirologicheskaya kharakteristika kompleksov napochvennykh goryuchikh materialov v dominiruyushchikh tipakh lesa Verkhne-Obsskogo massiva (yugo-vostok Zapadnoi Sibiri) (Pyrological characteristics of complexes of ground combustible materials in the dominant forest types of the Upper Ob massif (southeast of Western Siberia)), *Lesnoe khozyaistvo*, 2015, No. 1, pp. 36–37.
- Goldammer J.G., Furyaev, V. V., *Fire in ecosystems of boreal Eurasia*, Dordrecht: Springer, Netherlands, 1996, 528 p.
- Ivanova G.A., Ivanov V.A., Zonal’nost’ lesnykh goryuchikh materialov i ikh pirogennaya transformatsiya v sosnyakh Srednei Sibiri (Zoning of forest combustible materials and their pyrogenic transformation in pine forests of Central Siberia), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Lesnoi zhurnal*, 2020, No. 4, (376), pp. 9–26.
- Ivanova G.A., Konard S.G., Makrae D.D., Bezkorovainaya I.N., Bogorodskaya A.V., Zhila S.V., Ivanov V.A., Ivanov A.V., Kovaleva N.M., Krasnoshchekova E.N., Kukavskaya E.A., Oreshkov D.N., Perevoznikova V.D., Samsonov Yu.N., Sorokin N.D., Tarasov P.A., Tsvetkov P.A., Shishkin A.S., *Vozdeistvie pozharov na komponenty ekosistemy srednetazhnykh sosnyakov Sibiri* (The effect of fires on ecosystem components in pine forests of the middle taiga in Siberia), Novosibirsk: Nauka, 2014, 232 p.
- Ivanova G.A., Kukavskaya E.A., Bezkorovainaya I.N., Bogorodskaya A.V., Zhila S.V., Ivanov V.A., Kovaleva N.M., Krasnoshchekova E.N., Tarasov P.A. *Vozdeistvie pozharov na svetlokhvoinnye lesa Nizhnego Priangara* (Impact of fires on light coniferous forests of the Lower Angara region), Novosibirsk: Nauka, 2022, 204 p.
- Ivanova G.A., Kukavskaya E.A., Ivanov V.A., Conard S.G., McRae D.J., Fuel characteristics, loads and consumption in Scots pine forests of central Siberia, *Journal of Forestry Research*, 2020, Vol. 31, No. 6, pp. 2507–2524.
- Kasischke E.S., Bruhwiler L.M., Emissions of carbon dioxide, carbon monoxide and methane from boreal forest fires in 1998, *Journal of Geophysical Research*, 2003, Vol. 108, pp. 2–16.
- Kauffman J.B., Martin R.E., Fire behavior, fuel consumption, and forest-floor changes following prescribed understory fires in Sierra Nevada mixed conifer forests, *Canadian Journal of Forest Research*, 1989, Vol. 19, pp. 455–462.
- Knapp E.E., Keeley J.E., Ballenger E.A., Brennan T.J., Fuel reduction and coarse woody debris dynamics with early and late season prescribed fire in a Sierra Nevada mixed conifer forest, *Forest Ecology and Management*, 2005, Vol. 208, pp. 383–397.
- Knapp E.E., Varner J.M., Busse M.D., Skinner C.N., Shestak C.A., Behaviour and effects of prescribed fire in

- masticated fuelbeds, *International Journal of Wildland Fire*, 2011, Vol. 20, No 8, pp. 932–945.
- Kukavskay E.A., Ivanova G.A., Conard S.G., McRae D.J., Ivanov V.A., Biomass dynamics of central Siberian Scots pine forests following surface fires of varying severity, *International Journal of Wildland Fire*, 2014, No. 23(6), pp. 872–886.
- Kurbatskii N.P., Issledovanie kolichestva i svoystv goryuchikh materialov (Studying amounts and properties of forest fuel), In: *Voprosy lesnoi pirologii* (Challenges of the forest pyrology), Krasnoyarsk: Izd-vo ILiD SO AN SSSR, 1970, pp. 5–58.
- Lupyan E.A., Bartalev S.A., Balashov I.B., Egorov B.A., Ershov D.B., Kobets D.A., Sen'ko K.S., Stytsenko F.B., Sychugov I.G., Sputnikovyi monitoring lesnykh pozharov v 21 veke na territorii rossiiskoi federatsii (tsifry i fakty po dannym detektirovaniya aktivnogo goreniya) (Satellite monitoring of forest fires in the 21st century on the territory of the Russian Federation (figures and facts based on active burning detection data)), *Sovremennyye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 158–175.
- Malmström A., Persson T., Ahlström K., Gongalsky K.B., Bengtsson J., Dynamics of soil meso- and macrofauna during a 5-year period after clear-cut burning in a boreal forest, *Applied Soil Ecology*, 2009, Vol. 43, pp. 61–74.
- Marozas V., Racinskas J., Bartkevicius E., Dynamics of ground vegetation after surface fires in hemiboreal *Pinus sylvestris* forests, *Forest Ecology and Management*, 2007, Vol. 250, pp. 47–55.
- Matveev P.M., Vliyanie lesovozobnovitel'nykh vyzhiganiy na sredoformiruyushchie funktsii severotaezhnykh listvennichnikov Vostochnoi Sibiri (The influence of reforestation burning on the environment-forming functions of northern taiga larch trees in Eastern Siberia), In: *Informatsionnyi listok* (Fact sheet), Moscow: VNIITslesresurs, 1995, pp. 60–61.
- McRae D.J., Conard S.G., Ivanova G.A., Sukhinin A.I., Baker S.P., Samsonov Y.N., Blake T.W., Ivanov V.A., Ivanov A.V., Churkina T.V., Hao W.M., Koutzenogij K.P., Kovaleva N.M., Variability of fire behavior, fire effects, and emissions in Scotch pine forests of Central Siberia, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, Vol. 11, Iss. 1, pp. 45–74.
- McRae D.J., Alexander M.E., Stocks B.J., Measurement of fuels and fire behavior on prescribed burns, *Canadian forestry service department of the environment report*, 1979, No. 0-X-287, 44 p.
- Miller C., Urban D.L. Modeling the effects of fire management alternatives on Sierra Nevada mixed-conifer forests, *Ecological Applications*, 2000, Vol. 10, pp. 85–94.
- Moretti M., Duelli P., Obrist M.K., Biodiversity and resilience of arthropod communities after fire disturbance in temperate forests, *Oecologia*, 2006, Vol. 149, pp. 312–327.
- Neary D.G., Klopatek C.C., DeBano L. F., Ffolliott P.F., Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis, *Forest Ecology and Management*, 1999, Vol. 122, pp. 51–71.
- Parro K., Köster K., Jögeste K., Vodde F., Vegetation dynamics in a fire damaged forest area: the response of major ground vegetation species, *Baltic Forestry*, 2009, Vol. 15, pp. 206–215.
- Pausas J.G., Keeley J.E., A burning story: the role of fire in the history of life, *Bioscience*, 2009, No. 59, pp. 593–601.
- Payette S., Fire as a controlling process in the North American boreal forest / A Systems Analysis of the Global Boreal Forest, Cambridge University Press, 1992, P. 144–169.
- Pietikäinen J., Fritze H., Clear-cutting and prescribed burning in coniferous forest: comparison of effects on soil fungal and total microbial biomass, respiration activity and nitrification, *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, Vol. 27, Iss. 1, pp. 101–109.
- Ponomarev E.I., Shvetsov E.G., Usataya Yu.O., Registratsiya energeticheskikh kharakteristik pozharov v lesakh Sibiri dstantsionnymi sredstvami (Registration of energy characteristics of fires in Siberian forests by remote means), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2017, No. 4, pp. 3–11.
- Prescribed burning in Russia and neighbouring temperate-boreal Eurasia*, A publication of the Global Fire Monitoring Center (GFMC), Dordrecht: Kessel Publ. House, 2013, 326 p.
- Pressler Y., Moore J.C., Cotrufo M.F., Belowground community responses to fire: meta-analysis reveals contrasting responses of soil microorganisms and mesofauna, *Oikos*, 2019, Vol. 128, No. 3, pp. 309–327.
- Rothermel R.C., A mathematical model for fire spread predictions in wildland fires, *Research Paper INT-115*, Ogden, UT: US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1972, pp. 40.
- Ryan K.C., Knapp E.E., Varner J.M., Prescribed fire in North American forests and woodlands: history, current practice, and challenges, *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2013, Vol. 11, pp. 15–24.
- Silva F. D., Portella A.C. F., Giongo M., Meta-analysis of studies on the effect of fire on forest biomes in relation to fungal microorganisms, *Advances in Forestry Science*, 2020, Vol. 7, No. 1, pp. 931–938.
- Spravochnik po klimatu SSSR* (USSR climate data), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1967, Vol. 21, Part 2, 504 p.
- Stocks B.J., Mason J.A., Todd J.B., Bosch E.M., Wotton B.M., Amiro B.D., Flannigan, M. D., Hirsch K.G., Logan K.A., Martell D.L., Skinner W.R., Large forest fires in Canada, 1959–1997, *Journal of Geophysical Research*, 2003, Vol. 108, pp. 1–12.
- Sukhinin A.I., French N.H. F., Kasischke E.S., Hewson J.H., Soja A.J., Csiszar I.A., Hyer E.J., Loboda T., Conrad S.G., Romasko V.I., Pavlichenko E.A., Miskiv S.I., Slinkina O.A., AVHRR-based mapping of fires in Russia: new products for fire management and carbon cycle studies, *Remote Sensing of Environment*, 2004, Vol. 93, pp. 546–564.
- Tsvetkov P.A., Zapasy goryuchikh materialov v lesakh severovostoka Evenkii (Pool of fuels in forests of northeastern Evenkia), *Lesnoe khozyaistvo*, 2001, No. 4, pp. 33–35.
- Valendik E.N., Verkhovets S.V., Kisilyakhov E.K., Ivanova G.A., Bryukhanov A.V., Kosov I.V., Goldammer I., *Tekhnologii kontroliruemyykh vyzhiganiy v lesakh Sibiri* (Technologies of controlled burning in the forests of Siberia), Krasnoyarsk: Sibirskii fed. universitet, 2011, 160 p.
- Van Wagner C.E., The line intersect method in forest fuel sampling, *Forest Science*, 1968, Vol. 14, No. 1, pp. 20–26.
- Van Wagtendonk J.W., Use of a deterministic fire growth model to test fuel treatments, *Sierra Nevada Ecosystem Project: Final report to Congress, Assessments and scientific basis for management options*, Davis: University of California, Centers for Water and Wildland Resources, 1996, Vol. II, Chapter. 43, pp. 1155–1165.
- Zhang Y.-H., Wooster M.J., Tutubalina O., Perry G.L. W., Monthly burned area and forest fire carbon emission estimates for the Russian Federation from SPOT VGT, *Remote Sensing of Environment*, 2003, Vol. 87, pp. 1–15.