

## Трансформация напочвенного покрова при низовых пожарах и оценка пирогенной эмиссии углерода в темнохвойных лесах Средней Сибири

Е. А. КУКАВСКАЯ<sup>1</sup>, Л. В. БУРЯК<sup>2,3</sup>, О. П. КАЛЕНСКАЯ<sup>2</sup>, Д. С. ЗАРУБИН<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН  
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28  
E-mail: kukavskaya@ksc.krasn.ru

<sup>2</sup> Сибирский государственный технологический университет  
660049, Красноярск, просп. Мира, 82

<sup>3</sup> Государственный природный биосферный заповедник “Центральносибирский”  
663246, Красноярский край, пос. Бор, ул. Грибная, 1а

Статья поступила 09.07.2015

Принята к печати 17.06.2016

### АННОТАЦИЯ

Изучены структура и запасы органического вещества на поверхности почвы в темнохвойных насаждениях с преобладанием кедра в среднетаежной зоне Средней Сибири на территории государственного природного биосферного заповедника “Центральносибирский”. Проанализировано воздействие низовых пожаров разной формы и силы на напочвенный покров. Установлено, что пожары от слабой до средней силы снижают запасы напочвенного покрова с 35–49 до 26–28 т/га, а пожары от средней силы до сильных – до 17–18 т/га. Выявлено, что при пожарах сгорает от 3 до 29 т/га ветвей и валежа в зависимости от допожарных характеристик древесных материалов, формы пожара и силы пирогенного воздействия. Дана оценка эмиссии углерода, которая при устойчивых пожарах, распространявшихся при показателе пожарной опасности по условиям погоды ПВ-1  $3919 \pm 482$ , от слабой до средней силы составила 14,0 т С/га, от средней силы до сильных – 24,6 т С/га. Наименьшая величина эмиссии углерода (10,1 т С/га) отмечена при беглых пожарах при ПВ-1, равном  $1167 \pm 386$ .

**Ключевые слова:** средняя тайга, кедровые насаждения, запасы и структура напочвенных горючих материалов, устойчивые и беглые пожары, показатель пожарной опасности по погоде, полнота сгорания, эмиссия углерода.

Пожары являются одним из главных естественных факторов, вызывающих закономерную смену растительности и оказывающих существенное воздействие на структуру лесов, их биомассу и цикл углерода [Фуряев, 1996; Harden et al., 2000]. В бореаль-

ных лесах Сибири они ежегодно охватывают несколько миллионов гектар [Kukavskaya et al., 2013b] и являются одним из основных факторов, обуславливающих нарушенность лесных экосистем [Валендик, 2008]. Согласно глобальным климатическим моделям в

конце XXI в. температура поверхности Земли увеличится на 0,3–4,8 °С в сравнении с периодом 1986–2005 гг., при этом наибольший рост ожидается на территории Северной Евразии [IPCC, 2013]. При изменении климата в бореальных лесах ожидается увеличение частоты пожаров, площади, пройденной огнем, и интенсивности горения, а также возрастание количества экстремальных пожаров и пожаров от молний [Flannigan et al., 2009]. Для Азиатской части России модели предсказывают существенное увеличение продолжительности пожароопасного сезона [Мохов, Чернокульский, 2010]. Анализ различных индексов пожарной опасности по условиям погоды показал, что она в Сибири за последние 100 лет возросла [Groisman et al., 2007]. Уже сейчас в отдельных регионах Сибири зарегистрировано сокращение межпожарных интервалов в связи с наблюдаемыми изменениями климата [Kharuk et al., 2013].

В настоящее время в России на светлехвойные насаждения с преобладанием лиственницы и сосны приходится основная доля пройденной огнем площади [Krylov et al., 2014], что, прежде всего, обусловлено их абсолютным доминированием на покрытой лесом площади страны и более высокой природной пожарной опасностью. Темнохвойным лесам присуща меньшая опасность возникновения пожаров вследствие высокой влажности лесных горючих материалов [Софронов и др., 2005]. Однако при потеплении климата в периоды длительной засухи повышается вероятность распространения пожаров в темнохвойных лесах, где их последствия могут оказаться наиболее разрушительными. Возникновение пожаров в темнохвойных насаждениях в летний период при длительных засухах способствует их развитию в устойчивую форму. При этом низовые устойчивые пожары даже слабой силы губительны для кедровых лесов [Семечкин и др., 1985]. Принято считать, что темнохвойные леса являются наиболее древними, и в прошлом они были распространены значительно шире. Однако под влиянием пожаров, охватывавших в прошлом большие территории Сибири, они сменились сосново-лиственничными и березово-осиновыми насаждениями [Фалалеев, 1964]. Прогнозируется, что дальнейший рост час-

тоты пожаров может привести к исчезновению чистых кедровников на территории южной Сибири и к смене кедрачей, занимающих суходольные местообитания на севере, сосновыми насаждениями [Седых, 2014]. В то время как изучению последствий пожаров в светлехвойных лесах посвящено большое количество научных публикаций [Санников, 1981; Ильичев и др. 2003; Буряк и др., 2003; Цветков 2007; Иванова и др., 2014], работы по оценке влияния пирогенного фактора на темнохвойные насаждения немногочисленны и не охватывают всего спектра требующих изучения вопросов [Краснощеков, 2004; Седых, 2014].

Лесные пожары вносят значительный вклад в общий поток углерода в атмосферу, и в отдельные годы эмиссия при пожарах может достигать величины техногенной эмиссии углекислоты, обусловленной сжиганием ископаемого топлива, промышленными и сельскохозяйственными работами [Исаев, Коровин, 1999]. Оценки количества сгорающего вещества могут отличаться на порядок, соответственно варьируют и ежегодные эмиссии углерода [Soja et al., 2004]. Эмиссия углерода при пожарах на территории России по разным источникам составляет от 5 до 500 Мт С/год [Kukavskaya et al., 2013b]. Данная вариабельность оценок обусловлена применением различных методик, алгоритмов, баз данных и использования косвенных признаков и допущений при расчете эмиссии углерода. Наиболее важным источником ошибок при оценке пожарных эмиссий в бореальных лесах остается неизученность запасов комплекса горючих материалов и полноты их сгорания в зависимости от погодных и природных условий [Kukavskaya et al., 2013b]. Более точные оценки сгорающего вещества, а следовательно, и эмиссии углерода, можно получить при проведении экспериментов по моделированию пожаров и измерении до- и послепожарной биомассы, а также при обследовании свежих гарей и пожарищ и определении количества сгорающего органического вещества по разнице запасов в ненарушенных насаждениях и на площадях пройденных огнем [de Groot et al., 2009]. Для бореальных лесов Северной Америки к настоящему времени накоплено большое количество данных по полноте сгорания и эмиссии

углерода при пожарах для различных типов леса и участков лесных земель разных категорий, разработаны модели их связи с метеорологическими показателями [Stocks et al., 2004; Ottmar, Baker, 2007; deGroot et al., 2009], в то время как для лесов России такие данные единичны и, прежде всего, относятся к светлохвойным насаждениям (в основном сосновым) [Firescan, 1996; Кукавская, Иванова, 2006; McRae et al., 2006; Ivanova et al., 2011]. Выявлены некоторые особенности количества сгорающего вещества и выхода углерода при пожарах на участках лесных земель, пройденных рубками, с учетом региональных особенностей рубок, их вида и интенсивности, способов очистки лесосек от порубочных остатков [Kukavskaya et al., 2013a].

Цель данного исследования – установление закономерностей воздействия низовых пожаров разной формы и силы на структуру и запасы напочвенного покрова и оценка пирогенной эмиссии углерода в среднетаежных темнохвойных насаждениях Средней Сибири.

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Изучение воздействия пожаров на напочвенный покров и оценка эмиссии углерода проводились на территории государственного природного биосферного заповедника “Центральносибирский”. Вследствие статуса заповедника и труднодоступности его территории он характеризуется естественной периодичностью пожаров, обусловленной минимальным антропогенным вмешательством.

Климат региона исследований умеренно континентальный. Средняя температура января  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , июля  $+16\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Количество осадков 400–580 мм. Средняя высота снежного покрова варьирует от 94 до 114 см. Продолжительность безморозного периода составляет 65–96 дней [Горшков и др., 2003].

Предварительно проанализирована горимость территории заповедника на основе данных дистанционного зондирования Земли [Sukhinin et al., 2004; Petkov et al., 2012]. В период полевых работ на территории заповедника были заложены 11 пробных площадей: 6 в насаждениях, пройденных пожарами, и 5 – в контрольных длительно не горевших

лесных массивах (рис. 1). Согласно лесорастительного районирования [Коротков, 1994], объекты исследований находятся в Приенисейской лесорастительной провинции в пределах Средне-Сибирской плоскогорной лесорастительной области, где распространены кедровые, пихтовые, еловые, лиственничные и березовые насаждения при доминировании темнохвойных лесов. Исследованные насаждения на пробных площадях представлены смешанными хвойными древостоями с преобладанием кедра сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour) и участием в составе ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.), пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.), лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) и березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.). Периодичность пожаров на пробных площадях, определенная методом перекрестного датирования, варьировала от 100 до 200 лет, что характеризует ее как естественную для темнохвойных насаждений [Поликарпов, 1970; Shvidenko, Goldammer, 2001; Фуряев и др., 2006]. Средний диаметр древостоев на пробных площадях составил 24–40 см, высота – 22–24 м. Возраст элементов леса – 100–250 лет. Почвы – подзолистые длительно-мерзлотные иллювиально-гумусово-железистые. Кедровые насаждения пройдены низовыми пожарами, сила которых варьировала от слабой до сильной. В насаждениях на пробных площадях № 1–5 пожары развивали устойчивую форму, а на площади № 6 в основном беглую. Пожары действовали в летний период (июль – август), территория, пройденная огнем, варьировала от 25 до 106 га. Горение на каждом из пожаров распространялось в среднем 9–11 дней, в течение которых показатель пожарной опасности по условиям погоды ПВ-1 [Вонский и др., 1975], рассчитанный по данным ближайшей к участкам метеостанции в пос. Бор, составил в среднем  $3919 \pm 482$  на пробных площадях № 1–5 (при максимуме в 7576) и  $1167 \pm 386$  на площади № 6 (при максимуме в 3933), что характеризует пожарную опасность как высокую и среднюю соответственно. Отпад деревьев по запасу составил от 8 до 39 % в зависимости от силы пожаров. Лесоводственно-таксационная характеристика древостоев, пройденных пожарами, приведена в табл. 1.

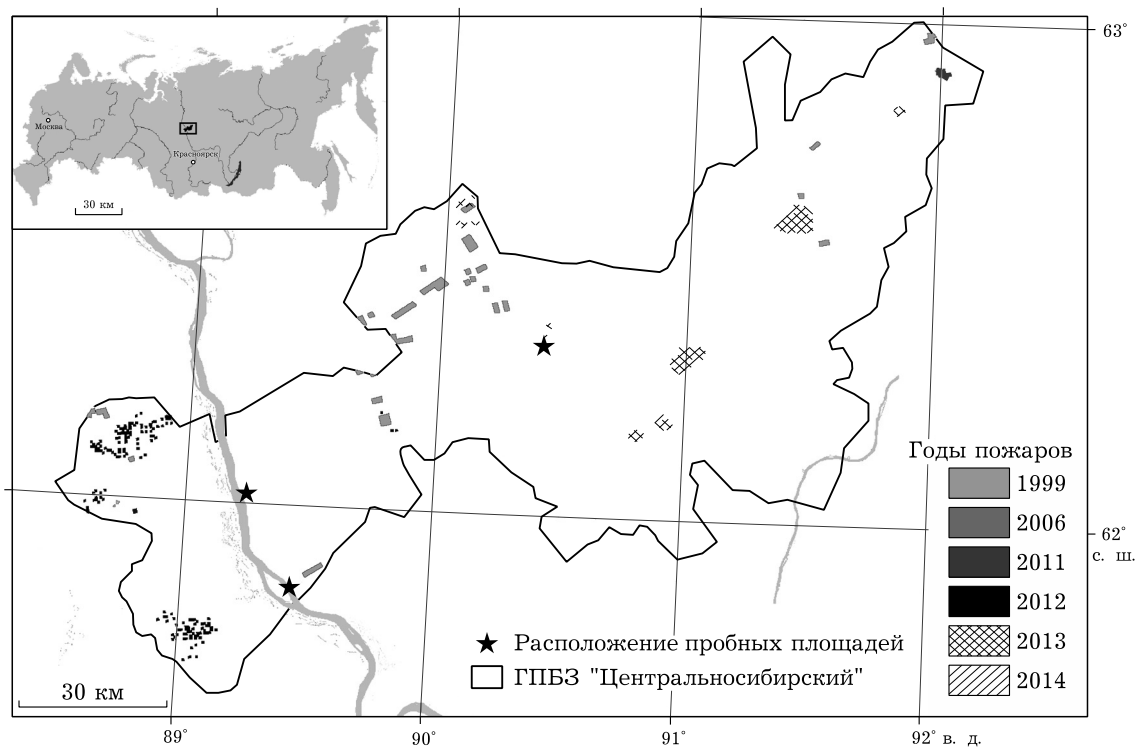


Рис. 1. Расположение пробных площадей на территории ГПБЗ "Центральносибирский". Оттенками серого показаны пожары по данным дистанционного зондирования за период с 1996 по 2015гг.

На пробных площадях описан видовой состав и степень общего проективного покрытия травяно-кустарничкового и мохового покрова, определена мощность слоев опада и подстилки, запасы напочвенных горючих материалов. Для установления запасов лесных

горючих материалов (ЛГМ) на каждой пробной площади закладывали по 15 площадок размером  $0,33 \times 0,33$  м, на которых отдельно собирали травы и кустарнички, опад, мох и подстилку, при этом старались охватить все многообразие растительного покрова. Образ-

Т а б л и ц а 1

**Лесоводственно-таксационная характеристика насаждений на пробных площадях**

Номер пробной площади	ВНУМ/склон	Характеристика пожаров		Характеристика древостоя до/после пожара			
		форма	сила	состав	полнота	запас, м <sup>3</sup> /га (% опада)	бонитет
1	82 м	Устойчивая	От слабой до средней	5К4Лц1Е+П, ед. Б	1,0	512 (15)	III
				4К5Лц1Е+П	0,8		
2	73 м/ЮЗ 3°		средней	8К2Лц+Е, ед. П, Б	1,2	560 (10)	IV
				8К2Лц+Е, ед. П, Б	1,1		
3	56 м			7К3Е, ед. П	1,1	641 (8)	III
				7К3Е, ед. П	1,0		
4	87 м/ЮЗ 5°		От средней до сильной	5К4Лц1Е, ед. П	1,4	747 (35)	IV
				4К5Лц1Е, ед. П	0,9		
5	54 м/ЮЗ 10°			4К4Лц2Е+Б	1,3	472 (39)	III
				5Лц3К2Е+Б	0,8		
6	234 м	Беглая		8К1Е1Б	0,5	230 (33)	IV
				8К1Е1Б	0,3		

цы ЛГМ сушили в лабораторных условиях до достижения ими абсолютно сухого состояния. Учет запаса упавших древесных горючих материалов (УДГМ), представленных ветвями и валежом разной степени деструкции, проводился методом пересеченных линий на 25 пятиметровых трансектах [Van Wagner, 1968; McRae et al., 2006] с разделением древесных элементов на участках, пройденных огнем, на до- и послепожарные.

Количество сгорающего органического вещества рассчитывалось по разнице запасов на участках, пройденных пожаром, и на контрольных участках, неподверженных пирогенному воздействию. В качестве последних рассматривались длительно негоревшие насаждения, располагающиеся в непосредственной близости от пробных площадей, пройденных пожарами, в одинаковых лесорастительных условиях и характеризующиеся одинаковыми лесоводственно-таксационными показателями. При определении сгоревшего запаса горючих материалов свежий опад, а также травы и кустарнички, появившиеся после воздействия пожаров, не учитывались. Для наиболее точного определения сгорающей органики подбирались участки, пройденные пожаром в год проведения измерений. Эмиссия углерода принималась равной 50 % от сгорающего запаса органического вещества [Levin, Cofer, 2000].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Характеристика лесопожарной ситуации на территории государственного природного биосферного заповедника “Центрально-сибирский”.** Согласно данным спутникового мониторинга на территории заповедника “Центральносибирский” за период с 1996 по 2015 г. пожары зафиксированы в 1999, 2006, 2011–2014 гг. (см. рис. 1). Причиной пожаров, возникших в последние десятилетия на территории заповедника, является грозозависимая деятельность. В отдельные годы они охватывали значительные площади, прежде всего, из-за труднодоступности участков для тушения пожаров. Наблюдается тенденция возрастания количества и площади пожаров в последнее пятилетие как по данным официальной статистики, так и по спутниковым дан-

ными [Буряк и др., 2014]. Так, в 2012 и 2013 гг. горимость территории заповедника составила 1,0 и 0,5 %, что, согласно методике Г. А. Мокеева [1965], характеризует ее как чрезвычайную и высокую соответственно. В целом для среднетаежной зоны и для территории заповедника характерно преобладание летних пожаров, что обусловлено доминированием моховых типов леса и значительной площадью темнохвойных насаждений, характеризующихся сомкнутой структурой древостоев и высоким влагосодержанием напочвенных горючих материалов, что обуславливает более поздний сход снега и более длительное пожарное созревание участков.

**Влияние пожаров на запасы и структуру органического вещества на поверхности почвы в темнохвойных насаждениях.** Живой напочвенный покров в длительно негоревших исследованных насаждениях представлен мхами *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt., *Hylocomium splendens* (Hedw.) B. S. G., *Polytrichum commune* Hedw. и *Sphagnum* spp. В травяно-кустарничковом ярусе доминируют *Vaccinium vitis-idaea* L., *Calamagrostis obtusata* Trin., *Gymnocarpium dryopteris* (L.) Newman, *Equisetum sylvaticum* L., *Pyrola rotundifolia* L., *Maianthemum bifolium* (L.) F. W. Schmidt, *Galium boreale* L. и др. Запасы напочвенного покрова варьируют от 34,8 до 49,3 т/га (табл. 2). Основная их доля (75–88 %) приходится на подстилку, которая включает в себя мощный слой очеса мха. Запасы опада в негоревших насаждениях минимальны за счет его быстрого разложения на влажном субстрате. Достоверных отличий в общих запасах напочвенного покрова не выявлено ( $t_{\phi}$ , коэффициент достоверности различий Стьюдента, варьирует от 0,09 до 1,96), за исключением контролей к участкам № 2 и 6 ( $t_{\phi} = 2,40$ ). Это свидетельствует о том, что изучаемые спелые и перестойные темнохвойные насаждения зеленомошной и долгомошной группы типов леса с преобладанием кедра в составе древостоев характеризуются близким запасом горючих материалов, который в изученных насаждениях региона исследования составляет  $43,6 \pm 5,4$  т/га, при точности опыта ( $p$ ) 5,5 % (см. табл. 2). В насаждениях на исследованных нами пробных площадях наблюдается достаточно высокое варьирование

Запасы напочвенного покрова в длительно не горевших темнохвойных насаждениях

Контроль к пробной площади	Запас, т/га (среднее $\pm$ SD)				
	живой напочвенный покров		опад	подстилка	итого
	травы, кустарнички	мох			
1 и 4	0,1 $\pm$ 0,05	7,6 $\pm$ 5,0	0,5 $\pm$ 0,4	35,3 $\pm$ 13,0	43,5 $\pm$ 13,4
2	0,3 $\pm$ 0,3	5,5 $\pm$ 3,5	0,2 $\pm$ 0,1	43,3 $\pm$ 19,7	49,3 $\pm$ 22,1
3	<0,1	8,9 $\pm$ 4,2	0,3 $\pm$ 0,2	35,8 $\pm$ 11,6	45,0 $\pm$ 16,9
5	0,3 $\pm$ 0,2	10,3 $\pm$ 5,2	0,2 $\pm$ 0,1	34,8 $\pm$ 10,2	45,6 $\pm$ 13,3
6	0,6 $\pm$ 0,5	5,3 $\pm$ 1,8	1,2 $\pm$ 0,2	27,7 $\pm$ 10,4	34,8 $\pm$ 11,2
Среднее	0,2 $\pm$ 0,2	7,5 $\pm$ 2,2	0,5 $\pm$ 0,4	35,4 $\pm$ 5,6	43,6 $\pm$ 5,4

запасов горючих материалов ( $V = 32-44\%$ ) и возрастание ошибок в точности учета массы с уменьшением доли компонента, что согласуется с данными других исследователей [Буряк и др., 2003].

На участках, пройденных огнем, обилие видов живого напочвенного покрова и степень проективного покрытия зависит от категории участка, типа леса, состояния древостоя, степени прогорания и давности последнего пожара. После сильных устойчивых пожаров на исследуемых пробных площадях из состава живого напочвенного покрова практически полностью, за исключением понижений нанорельефа, исчезли зеленые (*Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt., *Hylocomium splendens* (Hedw.), *Polytrichum commune* Hedw.) и сфагновые (*Sphagnum* spp.) мхи, доминирующие в насаждениях до воздействия огня. На участках, где пожар развивал наибольшую интенсивность, подстилка прогорела полностью до минерального слоя почвы. При пожарах слабой силы напочвенный покров прогорел мозаично, участки со сфагновыми мхами и *Polytrichum commune* Hedw. огонь обошел стороной, либо спекся только верхний слой мхов, что тем не менее привело к отмиранию мхов на большей части участков.

В год пожара насаждения, пройденные огнем, представлены мертвопокровным типом. Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса не превышало 5–10%. Начинают всходить *Calamagrostis obtusata* Trin., *Maianthemum bifolium* (L.), *Carex globularis* L., *Equisetum sylvaticum* L., *Linnaea borealis* L., *Gallium boreale* L. Отмечается синузильность напочвенного покрова и приуроченность отдель-

ных видов к определенным условиям место-произрастания (элементам нанорельефа, окнам в пологе древостоя, стенам леса и т. д.), степени прогорания напочвенного покрова. Так, *Calamagrostis obtusata* Trin. и *Chamaenerion angustifolium* (L.) Holub разрастаются на наиболее освещенных участках, мхи остаются в пониженных элементах нанорельефа, *Dicranum* и *Marchantia* появляются на участках, прогоревших до минерального слоя, при этом *Marchantia* – на почвах с избыточным увлажнением. В последующем пройденные пожарами насаждения зарастают по вейниковому, кипрейному и разнотравному типам.

После воздействия пожаров от слабой до средней силы запасы напочвенного покрова в насаждениях с преобладанием кедра составили 25,9–27,9 т/га (табл. 3). Пожары от средних до сильных снизили запасы напочвенного покрова до 16,8–18,0 т/га. После пожаров наблюдается увеличение вариабельности запасов в связи с неравномерным прогоранием участков.

Запасы опада в насаждениях, пройденных пожарами, незначительны ( $\leq 0,4$  т/га), поскольку, большая его часть сгорела, а усохшая в результате теплового воздействия хвоя в период проведения исследований (через 20–50 дней после пожара) только начинает опадать.

Живой напочвенный покров на участках, после слабых пожаров, представлен в основном мхами, которые сохранились в связи с мозаичностью прогорания участков. Пожары высокой интенсивности привели к полной гибели мхов на участках № 4 и 6, на участке № 5 их запас составил 0,8 т/га.

Запасы напочвенного покрова на участках, пройденных низовыми пожарами разной силы

Пробная площадь	Сила пожаров	Запас, т/га (среднее $\pm$ SD)			
		травы, кустарнички	опад	мох, подстилка	итого
1	От слабой	–	0,1 $\pm$ 0,1	25,8 $\pm$ 4,8	25,9 $\pm$ 4,8
2	до средней	<0,1	0,2 $\pm$ 0,2	26,3 $\pm$ 7,0	26,5 $\pm$ 7,0
3		0,4 $\pm$ 0,2	0,6 $\pm$ 0,5	26,9 $\pm$ 15,4	27,9 $\pm$ 15,7
4	От средней	<0,1	0,9 $\pm$ 0,6	17,1 $\pm$ 10,0	18,0 $\pm$ 10,4
5	до сильной	–	0,7 $\pm$ 0,6	16,1 $\pm$ 10,6	16,8 $\pm$ 1,0
6		–	0,5 $\pm$ 0,3	17,3 $\pm$ 2,2	17,8 $\pm$ 2,4

Запасы упавших древесных горючих материалов, представленных ветвями и валежом различной степени деструкции, на контрольных участках варьируют от 16,5 до 54,3 т/га (рис. 2). Основное количество приходится на древесные элементы более 7 см (77–89 % от общего запаса), которые представлены выпавшими в результате естественного отбора деревьями, прежде всего, кедром (60–82 % от всего валежа). Полученные авторами данные по запасам древесного детрита согласуются с результатами исследований А. В. Климченко с соавт. [2011], которые установили, что количество крупного валежа в кедровых насаждениях средней тайги Приенисейской Сибири составляет в среднем 51,5 т/га.

На участках, пройденных огнем, запас ветвей и валежа составил 16,8–77,8 т/га, при этом на деревья, вывалившиеся спустя 1–2 мес. после воздействия пожара, приходится 16–59 % общего запаса упавших древесных материалов (см. рис. 2). Исключение составляет насаждение на пробной площади № 6, где на послепожарный отпад приходится всего около 1 % от запаса ветвей и валежа на поверхности почвы. Это обусловлено невысокой полнотой и низкой производительностью данного насаждения, произрастающего на гриве в окружении болот, а также беглой формой пожара, при которой не происходит прогорание корневых лап и вывал деревьев. В целом процесс усыхания деревьев на пробных площадях, пройденных огнем,

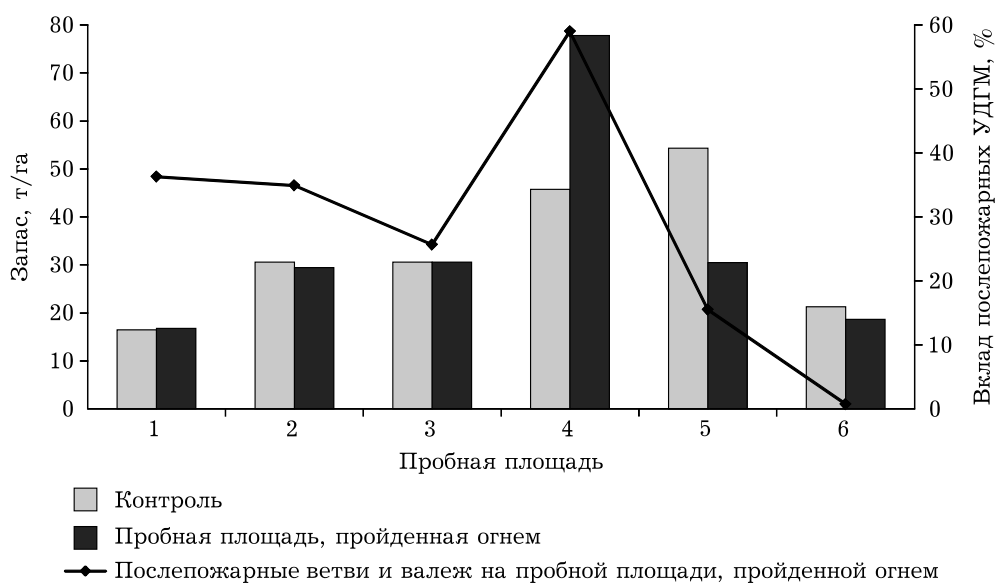


Рис. 2. Запасы ветвей и валежа на пробных площадях, пройденных пожарами, и на контрольных участках

**Полнота сгорания органического вещества на поверхности почвы и эмиссия углерода при низовых пожарах разной формы и силы в кедровых насаждениях**

Пробная площадь	Характеристика пожаров		Сгоревший запас напочвенных ЛГМ, т/га				Эмиссия углерода, т С/га
			% от допожарного значения				
	форма	сила	живой напочвенный покров	опад, подстилка	ветви, валеж	итого	
1	Устойчивая	От слабой	2,1	15,6	5,8	23,5	11,8
		до средней	28	43	35	39	
2			2,0	21,0	11,4	34,4	17,2
			35	48	37	43	
3			6,9	11,1	7,9	25,9	13,0
			78	31	26	34	
4		От средней	7,7	18,8	13,9	40,4	20,2
		до сильной	100	52	30	44	
5			9,7	19,7	28,6	58,0	29,0
			92	56	53	65	
6	Беглая		5,9	11,6	2,7	20,2	10,1
			100	40	13	31	

только начался и в ближайшие несколько лет ожидается, что количество упавших древесных материалов будет расти по мере гибели и вывала, поврежденных пожарами деревьев. Запасы ветвей и валежа на исследуемых участках в 1,5–5 раз и более превышают таковые в светлохвойных насаждениях средней и южной тайги Средней Сибири [Кукавская, Иванова, 2006; Трефилова и др., 2009; Ivanova et al., 2011]. Это можно объяснить большей продуктивностью темнохвойных насаждений и значительно меньшей частотой пожаров, характерной для темнохвойных лесов, в то время как в светлохвойных насаждениях в результате более частого воздействия пожаров часть древесных остатков сгорает.

**Оценка сгорающего запаса напочвенных горючих материалов и эмиссии углерода при пожарах.** Количество сгоревшего при пожарах органического вещества на пробных площадях в исследуемых кедровых насаждениях варьировало от 20,2 до 58,0 т/га (табл. 4). Приуроченные к пониженным элементам нанорельефа долгомошники и сфагновые мхи вследствие их высокого влагосодержания часто не горели, поэтому полнота сгорания по отдельным видам горючих материалов со-

ставила от 13 до 100 % их запаса до пожара. Так как пожары являлись низовыми, кровные горючие материалы не участвовали в процессе горения. Полностью сгорели опад, травы и кустарнички, упавшие древесные материалы небольших размеров, в то время как крупные древесные элементы, как правило, только обгорели. Исключение составили крупные древесные материалы большей степени разложения, которые продолжали тлеть длительное время после прохождения кромки пожара. Очес мха и подстилка сгорели частично в зависимости от влагосодержания горючих материалов, силы и формы пожара. На опад и подстилку приходится основной сгоревший запас (34–66 %). Вклад ветвей и валежа составил от 14 до 49 %, живого напочвенного покрова – 6–29 %. Наблюдается хорошая зависимость между запасами ветвей и валежа, сгоревшими при пожаре, и их допожарными значениями ( $R = 0,90$ ). Средняя корреляция ( $R = 0,45$ ) установлена для напочвенных горючих материалов, что, с одной стороны, вероятно, связано с влиянием вариабельности влагосодержания разных видов мхов и подстилки в различных элементах нанорельефа, а с другой – с устойчивой формой пожара, которая нивелирует влия-



ние изменчивости запасов горючих материалов на количество сгоревшего органического вещества.

Эмиссия углерода варьировала на участках от 10,1 до 29,0 т С/га, что в 2 и более раз превышает выход углерода при пожарах в сосновых и лиственничных насаждениях зеленомошной группы типов леса средней и южной тайги Средней Сибири [Кукавская, Иванова, 2006; McRae et al., 2006; Ivanova et al., 2011; Kukavskaya et al., 2013a]. Это связано с тем, что кедровые насаждения характеризуются большим запасом напочвенных горючих материалов, включая УДГМ (ветви и валеж), превышающий таковой в светлохвойных насаждениях. Кроме того, пожары на большинстве исследуемых участков носили устойчивый характер, при котором огонь заглубляется в подстилку, и горение может продолжаться длительное время после прохождения кромки пожара, что приводит к большему количеству сгорающей биомассы и, соответственно, увеличению эмиссии углерода. В среднем она составила 14,0 т С/га при устойчивых низовых пожарах от слабой силы до средней и 24,6 т С/га – от средней силы до сильных. Минимальная эмиссия углерода (10,1 т С/га) зарегистрирована на пробной площади № 6 при беглом пожаре, который распространялся при среднем показателе пожарной опасности по погоде ПВ-1, равном  $1167 \pm 386$ .

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Запасы органического вещества на поверхности почвы в спелых и перестойных темнохвойных насаждениях с преобладанием кедра варьируют от 60,0 до 91,3 т/га, при этом значительная изменчивость общих запасов обусловлена вкладом ветвей и валежа (27–61 %). Пожары снизили запасы органического вещества на поверхности почвы на 30–65 % в зависимости от силы пирогенного воздействия. После воздействия огня в регионе увеличивается доля травяных серий типов леса в связи с отмиранием мхов и их длительным восстановлением. Эмиссия углерода при низовых пожарах в темнохвойных насаждениях с доминированием кедра варьировала от 10,1 до 29,0 т С/га в зависимости от формы и силы пожара.

Изменение климата будет сопровождаться увеличением вероятности возникновения продолжительных засух, когда напочвенный покров просыхает полностью даже в темнохвойных насаждениях, приуроченных не только к влажным, но и переувлажненным условиям местопроизрастания [Pune et al., 2013]. В таких случаях возможно сгорание всего органического вещества на поверхности почвы, а эмиссия углерода в исследованных насаждениях может достигать 30–45 т С/га, что в несколько раз превышает максимально возможный выход углерода при пожарах в светлохвойных насаждениях средней и южной тайги Средней Сибири.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-4646.2015.5 и Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности. Авторы выражают благодарность директору ГПБЗ “Центральносибирский” П. В. Кочкареву и инспекторам заповедника за помощь в организации полевых исследований, а также анонимному рецензенту за ценные замечания по улучшению статьи.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Буряк Л. В., Кукавская Е. А., Зарубин Д. С., Каленская О. П., Толмачев А. В. Влияние пожаров на состояние хвойных насаждений Центральносибирского государственного заповедника // Тр. гос. природного биосферного заповедника «Центральносибирский». Красноярск: Сибирские промыслы, 2014. Вып. 3 (5). С. 60–76.
- Буряк Л. В., Лузганов А. Г., Матвеев П. М., Каленская О. П. Влияние низовых пожаров на формирование светлохвойных насаждений юга Средней Сибири. Красноярск: СибГТУ, 2003. 196 с.
- Валендик Э. Н. Пожары как постоянно действующий природный фактор в бореальных лесах Евразии // Пожары в лесных экосистемах Сибири. Красноярск: СО РАН, 2008. С. 15–18.
- Вонский С. М., Жданко В. А., Корбут В. И., Семенов М. М., Тетюшева Л. В., Завгородняя Л. С. Определение природной пожарной опасности в лесу: методические рекомендации. Л.: ЛенНИИЛХ, 1975. 39 с.
- Горшков С. П., Венденберг Дж., Алексеев Б. А., Мочалова О. И., Тишкова М. А. Климат, мерзлота и ландшафты Среднеисейского региона. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 2003. 81 с.
- Иванова Г. А., Коначев С. Г., Макаев Д. Д. и др. Воздействие пожаров на компоненты экосистемы среднетаежных сосняков Сибири. Новосибирск: Наука, 2014. 232 с.
- Ильичев Ю. Н., Бушков Н. Т., Тараканов В. В. Естественное лесовосстановление на гаях среднеобских боров. Новосибирск: Наука, 2003. 196 с.
- Исаев А. С., Коровин Г. Н. Углерод в лесах Северной Евразии // Круговорот углерода на территории России. М.: Изд-во Миннауки РФ, 1999. С. 63–95.

- Климченко А. В., Верховец С. В., Слинкина О. А., Кошурникова Н. Н. Запасы крупных древесных остатков в среднетаежных экосистемах Приенисейской Сибири // Геогр. и прир. ресурсы. 2011. № 2. С. 91–97.
- Коротков И. А. Лесорастительное районирование России и республик бывшего СССР // Углерод в экосистемах лесов и болот России. Красноярск: Ин-т леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 1994. С. 29–47.
- Краснощечков Ю. Н. Почвозащитная роль горных лесов бассейна озера Байкал. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2004. 224 с.
- Кукавская Е. А., Иванова Г. А. Воздействие лесных пожаров на биомассу сосновых насаждений Средней Сибири // Вестн. КрасГАУ. 2006. Вып. 12. С. 156–162.
- Мокеев Г. А. Влияние природных и экономических условий на горимость лесов и охрану их от пожаров // Современные вопросы охраны лесов от пожаров и борьбы с ними: сб. ст. / под ред. И. С. Мелехова. М.: Лесн. пром-сть, 1965. С. 26–37.
- Мохов И. И., Чернокульский А. В. Региональные модельные оценки риска лесных пожаров в азиатской части России при изменении климата // Геогр. и прир. ресурсы. 2010. № 2. С. 120–126.
- Поликарпов Н. П. Комплексные исследования в горных лесах Западного Саяна // Вопр. лесоведения. 1970. Т. 1. С. 26–79.
- Санников С. Н. Лесные пожары как фактор преобразования структуры, возобновления и эволюции биоценозов // Экология. 1981. № 6. С. 24–33.
- Седых В. Н. Динамика равнинных кедровых лесов Сибири. Новосибирск: Наука, 2014. 232 с.
- Семечкин И. В., Поликарпов Н. П., Ирошников А. И. и др. Кедровые леса Сибири. Новосибирск: Наука, 1985. 268 с.
- Софронов М. А., Голдаммер И. Г., Волокитина А. В., Софронова Т. М. Пожарная опасность в природных условиях. Красноярск: Ин-т леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2005. 330 с.
- Трефилова О. В., Ведрова Э. Ф., Оскорбин П. А. Запас и структура крупных древесных остатков в сосняках Енисейской равнины // Лесоведение. 2009. № 4. С. 16–23.
- Фалалеев Э. Н. Пихтовые леса Сибири и их комплексное использование. М.: Лесн. пром-сть, 1964. 166 с.
- Фуряев В. В. Роль пожаров в процессе лесообразования. Новосибирск: Наука, 1996. 252 с.
- Фуряев В. В., Заболотский, В. И., Голдаммер И. Г. Динамика пирологических режимов ландшафтных урочищ южной тайги Средней Сибири в XVIII–XX столетиях // Сиб. экол. журн. 2006. № 2. С. 141–150 [Furyaev V. V., Zabolotsky V. I., Goldammer I. G. Time course of pyrological regimes of landscape units of southern taiga of the Middle Siberia in the XVIII–XX centuries // Contemporary Problems of Ecology. 2006. N 2].
- Цветков П. А. Устойчивость лиственницы Гмелина к пожарам в северной тайге Средней Сибири. Красноярск: СибГТУ, 2007. 250 с.
- de Groot W. J., Pritchard J., Lynham T. J. Forest floor fuel consumption and carbon emissions in Canadian boreal forest fires // Canad. Journ. Forest Res. 2009. N 39. P. 367–382.
- Firescan, Fire in ecosystems of boreal Eurasia: The Bor forest island fire experiment Fire Research Campaign Asia-North (FIRESAN) // Biomass Burning and Global Change / ed. J. S. Levine. Cambridge: MIT Press, 1996. P. 848–873.
- Flannigan M. D., Krawchuk M. A., de Groot W. J., Wotton B. M., Gowman L. M. Implications of changing climate for global wildland fire // Int. Journ. Wildland Fire. 2009. N 18. P. 483–507.
- Groisman P. Y., Sherstyukov B. G., Razuvaev V. N., Knight R. W., Enloe J. G., Stroumentova N. S., Whitfield P. H., Forland E., Hannsen-Bauer I., Tuomenvirta H., Aleksandersson H., Mescherskaya A. V., Karl T. R. Potential forest fire danger over Northern Eurasia: Changes during the 20th century // Global and Planetary Change. 2007. N 56 (3-4). P. 371–386.
- Harden J. W., Trumbore S. E., Stocks B. J., Hirsch A., Gower S. T., O'Neill K. P., Kasischke E. S. The role of fire in the boreal carbon budget // Global Change Biol. 2000. N 6. P. 174–184. doi:10.1046/j.1365-2486.2000.06019.x
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / eds. T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. 1535 p.
- Ivanova G. A., Conard S. G., Kukavskaya E. A., McRae D. J. Fire impact on carbon storage in light conifer forests of the Lower Angara region, Siberia // Environ. Res. Lett. 2011. N 6. 045203. doi:10.1088/1748-9326/6/4/045203.
- Kharuk V. I., Dvinskaya M. L., Ranson K. J. Fire return intervals within the northern boundary of the larch forest in Central Siberia // Int. Journ. Wildland Fire. 2013. N 22. P. 207–211. http://dx.doi.org/10.1071/WF11181.
- Krylov A., McCarty J. L., Potapov P., Loboda T., Tyukavina A., Turubanova S., Hansen M. C. Remote sensing estimates of stand-replacement fires in Russia, 2002–2011 // Environ. Res. Lett. 2014. N 9. 105007. doi:10.1088/1748-9326/9/10/105007.
- Kukavskaya E. A., Buryak L. V., Ivanova G. A., Conard S. G., Kalenskaya O. P., Zhila S. V., McRae D. J. Influence of logging on the effects of wildfire in Siberia // Ibid. 2013a. N 8. 045034. doi:10.1088/1748-9326/8/4/045034.
- Kukavskaya E. A., Soja A. J., Petkov A. P., Ponomarev E. I., Ivanova G. A., Conard S. G. Fire emissions estimates in Siberia: Evaluation of uncertainties in area burned, land cover, and fuel consumption // Canadian Journ. Forest Res. 2013b. Vol. 43, N 5. P. 493–506. doi: 10.1139/cjfr-2012-0367.
- Levine J. S., Cofer W. R. Boreal forest fire emissions and the chemistry of the atmosphere // Fire, climate change and carbon cycling in North American boreal forests. New York: Springer, 2000. P. 31–48.
- McRae D. J., Conard S. G., Ivanova G. A., Sukhinin A. I., Baker S. P., Samsonov Y. N., Blake T. W., Ivanov V. A., Churkina T. V., Hao W. M., Koutzenogij K. P., Kovaleva N. Variability of fire behavior, fire effects and emissions in Scotch pine forests of central Siberia // Mitigation and adaptation strategies for global change. 2006. N 11. P. 45–74.

- Ottmar R. D., Baker S. P. Forest floor consumption and smoke characterization in boreal forested fuelbed types of Alaska. Final Report to the Joint Fire Science Program. Seattle, WA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Pacific Wildland Fire Sciences Laboratory, Fire and Environmental Research Applications (FERA) Team. 2007. 43 p.
- Petkov A., Hao W. M., Nordgren B., Corley R. E., Urbanski S. P., Ponomarev E. Evaluating the Accuracy of a MODIS Direct Broadcast Algorithm for Mapping Burned Areas Over Russia // AGU Fall Meeting. December 03–07, 2012, San-Francisco, USA.
- Pyne S. J., Swetnam T. W., Whitlock C. et al. Vegetation fires and global change. Challenges for concerted international action: A white paper directed to the United Nations and international organizations / ed. I. G. Goldammer. Remagen-Oberwinter: Kessel Publishing House, 2013. 399 p.
- Shvidenko, A., Goldammer J. G. The forest fire situation in Russia // Int. Forest Fire News. 2001. N 24. P. 41–59.
- Soja A. J., Cofer W. R., Shugart H. H., Sukhinin A. I., Stackhouse P. W., McRae D. J., Conard S. G. Estimating fire emissions and disparities in boreal Siberia (1998 through 2002) // J. Geophys. Res. 2004. N 109 (D14). D14S06. doi:10.1029/2004JD004570.
- Sukhinin A. I., French N. H., Kasischke E. S., Hewson J. H., Soja A. J., Csiszar I. A., Hyer E. J., Loboda T., Conard 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 Environ. 2004. N 93. P. 546–564.
- Stocks B. J., Alexander M. E., Wotton B. M., Steffner C. N., Flannigan M. D., Taylor S. W., Lavoie N., Mason J. A., Hartley G. R., Maffey M. E., Dalrymple G. N., Blake T. W., Cruz M. G., Lanoville R. A. Crown fire behaviour in a northern jack pine-black spruce forest // Canad. Journ. Forest Res. 2004. Vol. 34, N 8. P. 1548–1560.
- Van Wagner C. E. The line intersect method in forest fuel sampling // Forest Sci. 1968. N 1. P. 20–26.

## **Transformation of the Ground Cover after Surface Fires and Estimation of Pyrogenic Carbon Emissions in the Dark-Coniferous Forests of Central Siberia**

E. A. KUKAVSKAYA<sup>1</sup>, L. V. BURYAK<sup>2,3</sup>, O. P. KALENSKAYA<sup>2</sup>, D. S. ZARUBIN<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> *V. N. Sukachev Institute of Forest, SB RAS  
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/28  
E-mail: kukavskaya@ksc.krasn.ru*

<sup>2</sup> *Siberian State Technological University  
660049, Krasnoyarsk, Mira ave., 82*

<sup>3</sup> *Central Siberian State Nature Biosphere Reserve  
663246, Bor, Gribnaya str., 1*

Ground fuel loads and structure in the dark-coniferous forests with the dominance of Siberian pine were studied in the Central Siberian State Nature Biosphere Reserve located in the middle taiga of Central Siberia. The impacts of surface fires of various forms and severities were studied. Low- to moderate-severity fires were found to decrease ground fuel loads from 35–49 t/ha to 26–28 t/ha, while moderate- to high-severity fires – to 17–18 t/ha. Consumption of down woody debris varied from 3 to 29 t/ha depending on the prefire fuel characteristics, fire form and severity. Steady fires spreading under the fire danger index PV-1 of 3919 ± 482 resulted in carbon emissions of 14.0 tC/ha and 24.6 tC/ha due to fires of low- to moderate- and moderate- to high-severities, respectively. The lowest carbon emissions (10.1 tC/ha) were estimated to be due to fast-moving fire spreading under PV-1 of 1167±386.

**Key words:** Siberian pine stands, central taiga, loads and structure of ground fuels, steady and fast-moving fires, weather fire danger index, fuel consumption, carbon emissions.