

УДК 630*43:528.7

РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ СИБИРИ

Е. И. Пономарев^{1,2}, В. И. Харук^{1,2}, Н. Д. Якимов²

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

² Сибирский федеральный университет 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79

E-mail: evg@ksc.krasn.ru, kharuk@ksc.krasn.ru, nyakimov96@mail.ru

Поступила в редакцию 28.07.2017 г.

Приведены материалы геопространственного анализа, обобщенные характеристики и интерпретация параметров природных пожаров лесов Сибири, характерных для современных условий, полученных в результате многолетнего (1996–2016) спутникового мониторинга. Показано, что за 20-летний период мониторинга горимость лесов Сибири выросла. При этом широтная вариация пожаров, длительность пожароопасного периода и межпожарные интервалы согласуются с градиентом основной геофизической характеристики – приходящей солнечной радиацией. Данные спутникового мониторинга использованы для валидации адаптированной технологии оценки энергетических параметров горения и классификации пожаров переменной интенсивности. Технология мониторинга мощности тепловыделения активной зоны горения FRP (Fire Radiative Power) успешно применена для контроля пожаров экстремальной интенсивности и верховых пожаров. Инструментально зафиксировано, что суммарная площадь лесов, пройденных пожарами высокой энергии, составляет не менее 8.5 % от среднегодовой, а в отдельные годы может достигать 15–25 %. Обсуждается вопрос об актуальности построения адаптированных алгоритмов прогнозирования динамики пожаров переменной интенсивности. Выявлены характерные временные интервалы развития отдельных стадий пожара, а также модельные кривые, описывающие предельные значения динамики приращения площади. Дополнительно в работе анализируются характеристики используемых спутниковых систем (NOAA/AVHRR, Terra, Aqua/MODIS, Suomi NPP/VIIRS, Landsat-8 OLI, Sentinel-2), включая российский сегмент (Ресурс-П), перспективных для повышения эффективности дистанционного мониторинга пожаров в Сибири.

Ключевые слова: спутниковые данные, природный пожар, межпожарный интервал, геопространственный анализ, мощность тепловыделения, инсоляция.

DOI: 10.15372/SJFS20170503

ВВЕДЕНИЕ

Проблема природных пожаров актуальна во всех регионах мира, включая территорию России, в частности зону бореальных лесов Сибири. Долговременные ряды метеонаблюдений констатируют возрастание аномалий температуры воздуха в приземном слое, инструментально зафиксировано повышение глобальной температуры на 0.72–0.85 °C с начала XXI в. (Rehfeldt et al., 2012; IPCC, 2014). Отмечен рост температуры и на территории Сибири, сопровождаю-

щийся изменением режима выпадения осадков, увеличением длительности засушливых периодов (Школьник и др., 2012; Пономарев, Харук, 2016; Ponomarev, Kharuk, 2016). Откликами на такие процессы может быть и изменение структуры растительного покрова, и перестройка иерархических уровней лесной растительности, и переход экосистем в «неустойчивую фазу», когда неблагоприятные воздействия с большой вероятностью будут сопровождаться нелинейными откликами систем (Lenton et al., 2008; Rehfeldt et al., 2012). Изменения будут сопрово-

ждаться положительными трендами горимости лесов на региональном и особенно на субрегиональном уровне (Ваганов и др., 1998; Валендик, Иванова, 2001; Шерстюков Б. Г., Шерстюков А. Б., 2014).

Тенденция повышения уровня горимости лесов выявлена во всем мире (Kharuk et al., 2008; Kasischke et al., 2010; Dennison et al., 2014). Отмечено, что первая декада XXI в. характеризовалась увеличением частоты возникновения пожаров и площадей, ежегодно подвергающихся пирогенному воздействию как в масштабах Северного полушария (Flannigan et al., 2009), так, в частности, и в Сибири (Loupian et al., 2006; Kharuk et al., 2008, 2011; Пономарев, Харук, 2016; Ponomarev, Kharuk, 2016). При этом по имеющимся оценкам на территорию Сибири приходится до 70–90 % ежегодного количества лесных пожаров России (Forkel et al., 2012; Швиденко, Щепашенко, 2013; Shvidenko, Schepaschenko, 2013; de Groot et al., 2013). Около 30 % от числа регистрируемых возгораний сопровождаются отпадом или замещением древостоев (Krylov et al., 2014), в то время как ежегодно до 1.5–3 млн га леса гибнет в результате пожаров (Барталев и др., 2015).

Изучение, понимание и прогнозирование ситуации с лесными пожарами требует использования объективных средств контроля, долгосрочного мониторинга и пространственно-временной привязки данных, что в современных условиях и при современных масштабах процессов можно получать только на основе спутниковых мониторинговых комплексов.

В настоящее время горимость лесов Сибири и пространственно-временные закономерности возникновения пожаров на всей территории азиатской части России уже более 20 лет изучаются с использованием инструментальных данных спутникового мониторинга. В основе лежит информация, полученная при тематической обработке спутниковых съемок за период 1996–2016 гг. На основе этих материалов сформирован уникальный геоинформационный банк данных с широким набором атрибутивной информации. Комплексные работы в данном направлении были начаты в Институте леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, где приемный комплекс передачи изображений высокого разрешения HRPT (High-Resolution Picture Transmission) Национального управления по авионавигации и исследованию космического пространства США (НАСА – NASA) для работы со спутниковой информацией установлен в 1995 г.

С организацией Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр» СО РАН (ФИЦ КНЦ СО РАН) в 2017 г. аппаратная часть приемного комплекса была оснащена новой станцией УниСканTM–36 производства научно-технического центра СканЭкс, г. Москва, РФ, что позволило сформировать Единый региональный центр дистанционного зондирования Земли при партнерстве ФИЦ КНЦ СО РАН, госкорпорации «Роскосмос» и АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». Это позволяет продолжить перспективные работы по совершенствованию методов приема, тематической обработки и анализа спутниковой информации в целях проведения противопожарного мониторинга на территории Сибири.

В 2017 г. между Институтом леса им. В. Н. Сукачева СО РАН и Центром глобального мониторинга пожаров Института химии им. Макса Планка в г. Фрайбурге, Германия (The Global Fire Monitoring Center (GFMC), Max Planck Institute for Chemistry, Freiburg, Germany), подписано соглашение о формировании Регионального Евразийского центра мониторинга пожаров, который включен в состав Регионального центрально-азиатского ресурсного центра управления пожарами (Regional Central Asia Fire Management Resource Center) в г. Улан-Баторе, Монголия. Таким образом, данные о пожарах Сибири на современном этапе и в ближайшей перспективе существенно дополняют мировую систему лесопожарного мониторинга и позволяют рассматривать вопрос о горимости лесов бореальной зоны Сибири не только на региональном уровне, но и в контексте изучения и понимания планетарных процессов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В соответствии с зонированием территории лесного фонда РФ противопожарный мониторинг более чем 51 % лесов осуществляется только на основе спутниковой информации (Барталев и др., 2008). Таким образом, в современных условиях дистанционные данные составляют важную часть системы мониторинга природных пожаров в России. Практическая значимость результатов дистанционного мониторинга пожаров общепризнана как в России, так и за рубежом, поэтому данное направление активно развивается, включая разработку и ввод в эксплуатацию новых спутниковых систем, характеризующихся повышенными и адаптированными

Таблица 1. Характеристики используемых спутниковых систем

Показатель	Спутниковая система/аппаратура						
	NOAA/AVHRR	Terra, Aqua/MODIS	Suomi NPP/VIIRS	Landsat-8 OLI	Sentinel-2	Ресурс П	
Разработчик	NASA	NASA	NASA	NASA	Европейское космическое агентство (ESA)	«Роскосмос»	
Пространственное разрешение, м	1000	250; 500; 1000	375; 750	15; 30	10; 20; 60	2.5; 4; 23	
Охват территории в кадре, км	3000	2300	3000	185	290	38; 97	
Спектральный диапазон, мкм	0.58–12.50	0.45–14.38	0.40–12.48	0.43–1.39	0.44–2.19	0.48–0.90	
Частота обновления	6 ч	6 ч	12 ч	16 дней	5–10 дней	10 дней	
Эффективность	Детектирование активных пожаров	Средняя	Высокая	Высокая	Низкая	Низкая	Низкая
	Послепожарный мониторинг	Низкая	Средняя	Средняя	Высокая	Высокая	Высокая

характеристиками или даже непосредственно разработанных в целях выполнения противопожарного мониторинга.

Банк пожаров (термически активные пиксели на изображениях в ИК-диапазоне спектра), фиксируемых по всему миру, ежедневно пополняется на серверах NASA (Giglio et al., 2003; Giglio, 2013; LAADS DAAC – NASA, 2017), так как именно спутники мониторингового плана NASA составляют сегодня основу всех реализованных систем противопожарного мониторинга. Это касается и Информационной системы дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз) (Блок мониторинга пожарной опасности), которая работает с 2005 г. (Барталев и др., 2008), и запущенной в начале 2000-х гг. системы управления космическим мониторингом МЧС России ГИС «Каскад» (Кудрин, Резников, 2006). Помимо материалов мониторинговых спутниковых систем, как правило имеющих низкое пространственное разрешение, в работе активно используются съемки среднего и высокого пространственного разрешения. А в настоящее время появилась возможность регулярной работы с материалами российских спутников. Основные технические характеристики, актуальные применительно к задаче противопожарного мониторинга, обобщены в табл. 1.

Отметим, что спутниковые системы мониторингового плана в большей степени эффективны для детектирования термически активных участков в режиме реального времени. С учетом возможного приема информации от несколь-

ких систем, период обновления сведений может быть сокращен до 2–4 ч, а более детальную информацию о послепожарном состоянии растительности и динамике послепожарных изменений можно получать только с привлечением данных более высокого разрешения, периодичность обновления которых в настоящее время составляет от 5 до 20 дней. В оптимальном режиме работы системы мониторинга пожаров необходимо привлечение широкого спектра спутниковых данных.

Начиная с 1995 г. в исследовательских целях формируется банк данных о лесных пожарах, фиксируемых спутниковыми методами (Сухинин, 1996; Барталев и др., 2008; Пономарев, Швецов, 2013). Материалы получены посредством обработки данных спутниковых съемок NOAA/AVHRR (с 1996 г.) и Terra, Aqua/MODIS (с 2007–2008 гг. по настоящее время). База данных содержит более 2×10^6 записей за весь период наблюдений (табл. 2).

Атрибутивные параметры содержат данные о площади термически активной зоны, площади полигона пожара, вычисленной средствами ГИС, координаты центров полигонов, кратность регистрации, а также совокупную длительность детектирования пожара (время от первой до последней регистрации термически активной зоны). Используемый массив выборки удовлетворяет условиям проведения статистического анализа, а общая длительность рассмотренного ряда (20-летний период) позволяет характеризовать закономерности пожарных режимов и их повторяемости на территории Сибири.

Таблица 2. Содержание базы данных лесных пожаров

№	Год мониторинга	Спутник/прибор	Фактическая длительность наблюдений	Число термически активных зон	Число полигонов пожаров
1	1996	NOAA-12, 14/AVHRR	1.05–28.08	5192	4841
2	1997	NOAA-12, 14/AVHRR	1.05–9.10	4000	3367
3	1998	NOAA-12, 14/AVHRR	3.03–28.09	7743	6317
4	1999	NOAA-12, 14/AVHRR	7.04–21.10	25 921	10 499
5	2000	NOAA-12, 14/AVHRR	16.03–22.10	14 057	7677
6	2001	NOAA-12, 14/AVHRR	6.04–29.10	10 670	6990
7	2002	NOAA-12, 14, 15/AVHRR	12.03–31.10	25 640	10 480
8	2003	NOAA-12, 16/AVHRR	17.03–31.08	50 945	16 146
9	2004	NOAA-12, 15, 16/AVHRR	29.03–25.10	15 835	9540
10	2005	NOAA-12, 14, 15, 18/AVHRR	10.03–30.10	27 677	23 062
11	2006	NOAA-12, 15, 18/AVHRR	22.03–30.10	47 756	26 024
12	2007	NOAA-12, 15, 18/AVHRR	1.03–30.10	44 219	23 624
13	2008	NOAA-18/AVHRR; Terra/Modis	13.03–25.10	87 160	28 587
14	2009	NOAA-18/AVHRR; Terra/Modis	24.03–30.10	62 660	19 633
15	2010	NOAA-18, 19/AVHRR; Terra, Aqua/MODIS	27.03–20.10	69 155	18 794
16	2011	Terra, Aqua/MODIS	1.03–21.08	160 541	24 383
17	2012	Terra, Aqua/MODIS	15.03–4.09	295 665	23 666
18	2013	Terra, Aqua/MODIS	2.03–15.10	118 719	13 201
19	2014	Terra, Aqua/MODIS	1.03–8.10	221 376	30 454
20	2015	Terra, Aqua/MODIS	1.03–1.10	117 766	19 935
21	2016	Terra, Aqua/MODIS	1.03–5.10	169 493	19 099

Алгоритм обнаружения термически активных зон основан на определении соотношения между значениями радиационной температуры участка поверхности (пикселя), измеренной спутниковым радиометром, и заданного порогового значения. Величина порога рассчитывается на основании средней температуры фона и ее среднеквадратического отклонения в окрестности потенциального очага пожара с учетом эмпирически определенных числовых коэффициентов.

Подобный подход к обнаружению термически активных зон широко применяется во многих альтернативных алгоритмах обнаружения пожаров, например в алгоритме Fire Information for Resource Management System (FIRMS) NASA (Giglio et al., 2003; Justice et al., 2006).

Новые спутниковые системы и открывающиеся технические возможности позволяют получать большую степень детализации данных о пожарах растительности, степени воздействия пожаров на лесные экосистемы, в том числе оценить тренды послепожарного изменения природных комплексов в результате отпада древостоев и/или смены древесных пород. Повышение эффективности спутникового мо-

нитинга пожаров достигается за счет повышения пространственного разрешения данных, в том числе в тепловом диапазоне спектра, повышения чувствительности бортовой сканирующей аппаратуры, расширения используемых спектральных диапазонов и увеличения частоты обновления данных (с использованием систем Terra, Aqua/MODIS, Suomi NPP/VIIRS, см. табл. 1). Таким образом, наиболее перспективен в системе раннего обнаружения пожаров и уточнения характеристик их параметров радиометр VIIRS (пространственное разрешение до 375 м), находящийся на борту спутника Suomi National Polar-orbiting Partnership (Suomi NPP). Вероятность раннего обнаружения термических аномалий может быть повышена на величину до ~30 %. Адаптированные технологии позволяют повысить точность оценки площадей пожаров, в том числе в активной фазе, на 15–20 %, а также снизить порог обнаружения минимального очага горения с 300–500 до 150–200 м² (улучшение на 30 %). Возможно также усовершенствование технологии классификации участков пожара по интенсивности горения с использованием данных о радиационной мощности теплоизлучения на 15–20 % (рис. 1).

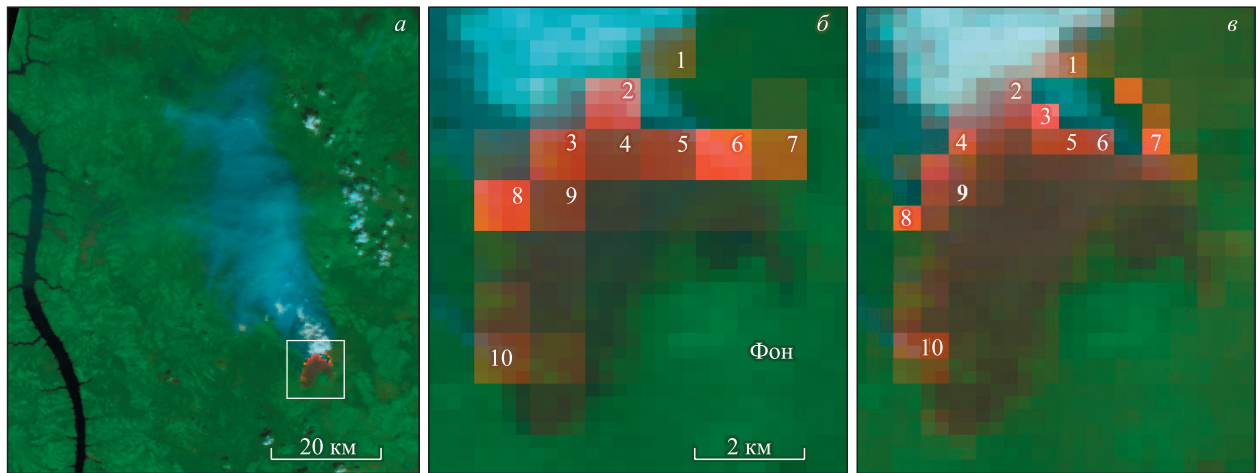


Рис. 1. Пример обработки спутниковой съемки при детектировании пожара и вычисления энергетических характеристик активной зоны: *а* – съемка MODIS Terra; *б* – активные пиксели (1–10) в тепловом диапазоне спектра с разрешением 1000 м; *в* – уточненные данные об активных пикселях (1–10) в среднем ИК-диапазоне с разрешением 500 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Обработка данных 20-летнего периода спутникового мониторинга позволяет говорить о среднесезонных показателях горимости (γ – отношение суммарной площади пожаров за сезон к общей площади лесов региона) по регионам Сибири, которые можно рассматривать как характерные для современных климатических условий и по степени антропогенного вклада в статистику возникновения пожаров.

В Приангарье диапазон варьирования $\gamma = 0.02$ – 7.90 % в год (среднее значение 1.65 %), в Эвенкии $\gamma = 0.001$ – 10.800 % в год (среднее значение 1.46 %), в Центральной Якутии $\gamma = 0.01$ – 14.50 % в год (среднее значение 2.23 %), в Забайкалье $\gamma = 0.16$ – 6.90 % в год (среднее значение 1.93 %). Показатели для Забайкалья не учитывают экстремальную горимость (более 25 % площади рассматриваемой территории) сезона 2003 г. Ежегодная динамика крупных пожаров в лесах Сибири (> 2.5 тыс. га) обобщена на рис. 2.

Пожарами этой категории по статистике пройдено до 90 % всех пострадавших площадей лесов Сибири в течение пожароопасного сезона. Тренд роста в течение рассматриваемого периода характеризовался достоверностью аппроксимации на уровне $R^2 = 0.5$ для $p < 0.05$, что справедливо также и для пожаров всех категорий включительно (Пономарев, Харук, 2016; Ponomarev, Kharuk, 2016).

Не принимая во внимание весенние пожары в зоне степей и лесостепей Сибири, которые, по

нашим оценкам, ежегодно составляют до 30 % от общего количества возгораний, можно констатировать существенное расширение зон массовой локализации пожаров (рис. 3), а именно: с 2011 по 2016 г. пожары в течение одного сезона регулярно группируются в нескольких субрегионах Сибири (Эвенкия, Якутия, Прибайкалье и юг Дальнего Востока), нередко действуя одновременно; регулярно повторяются сезоны (2006, 2007, 2011–2013 гг.) с повышенным уровнем горимости на территории северных районов Западной Сибири.

Характерные для рассматриваемых субрегионов показатели горимости (1.46–2.23 %) выше среднего значения для лесов Сибири (1.19 %)

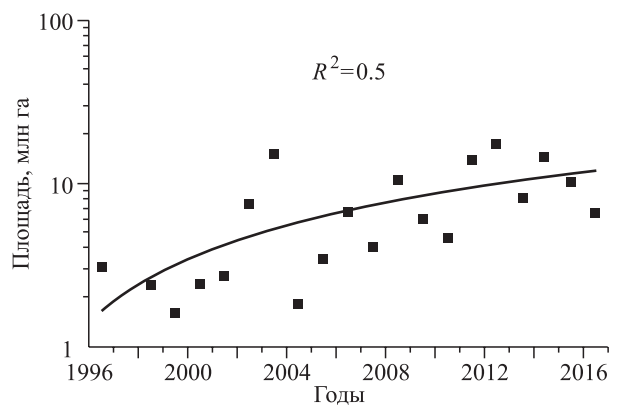


Рис. 2. Межсезонная динамика пожаров Сибири, относимых к категории экстремально крупных ($S > 2.5$ тыс. га). Рассмотренная выборка не включала весенние пожары в зоне степей и лесостепей юга Сибири.

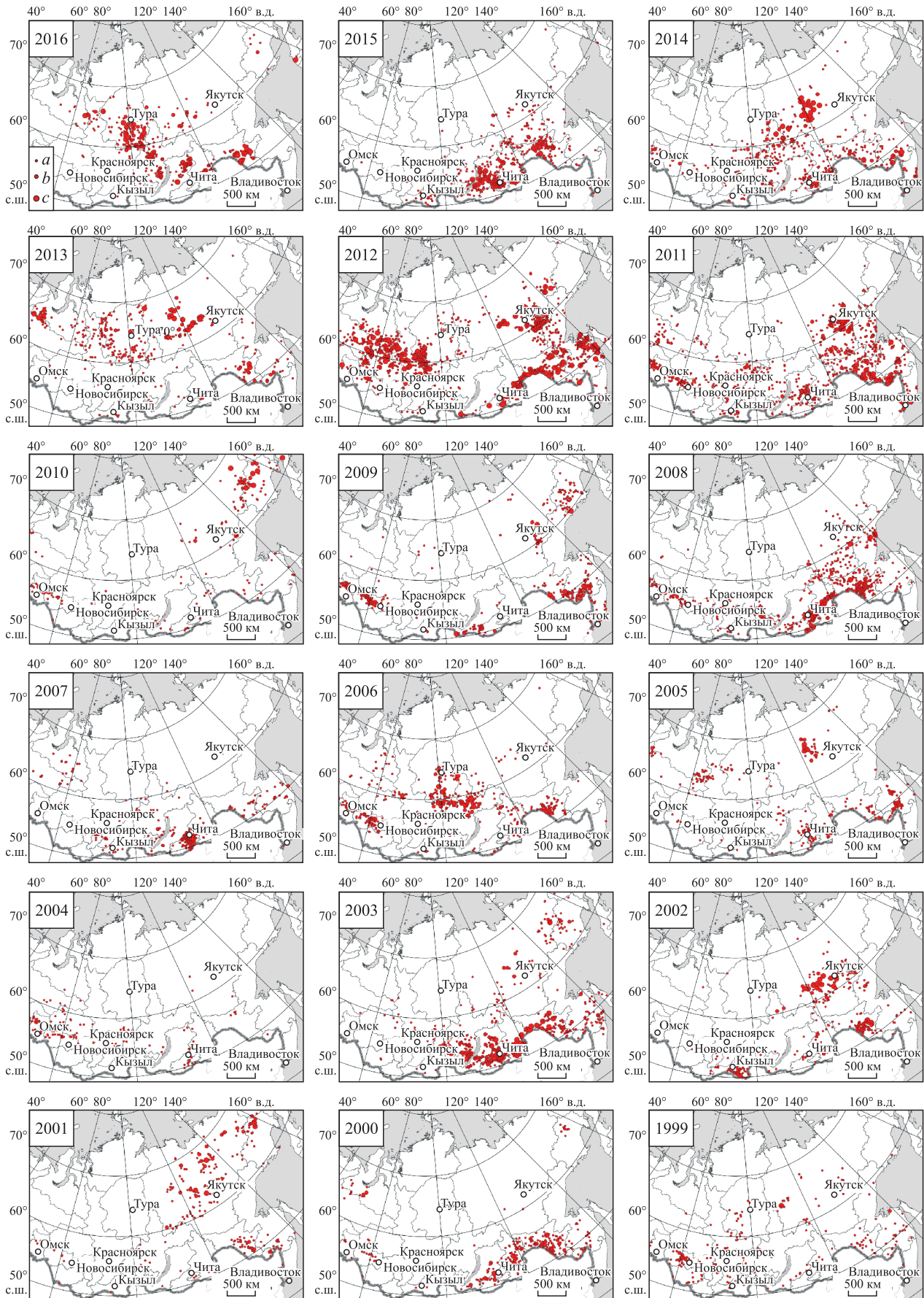


Рис. 3. Геопространственное представление вариации наиболее крупных пожаров по сезонам 1999–2016 гг. Категории площадей пожаров, тыс. га: *a* – до 20; *b* – от 20 до 50; *c* – более 50.

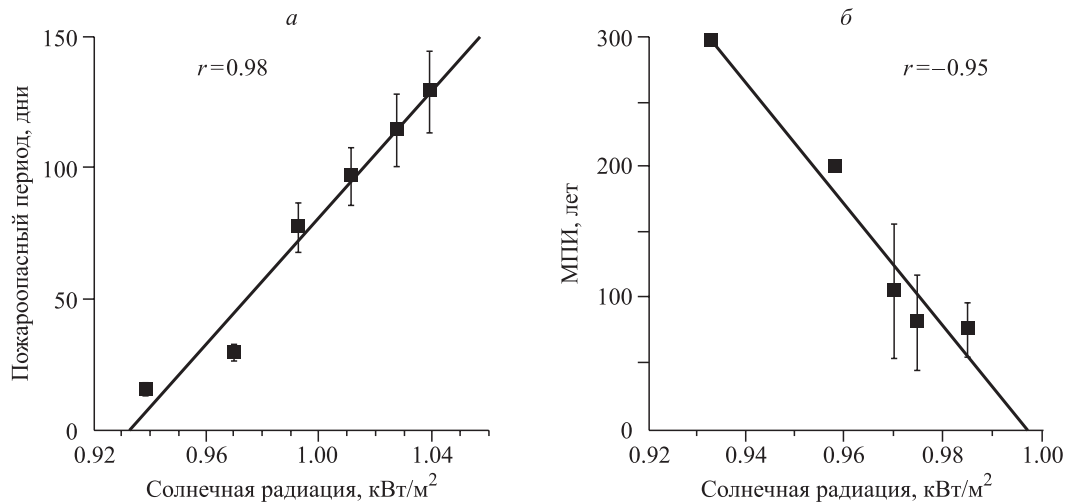


Рис. 4. Связь широтной вариации длительности пожароопасного периода (*а*) и межпожарного интервала (*б*) с градиентом геофизического параметра приходящей солнечной радиации.

(Ponomarev et al., 2016) и в разы превышают значение, характерное для пожаров в лесах запада Канады (0.56 %) (de Groot et al., 2013).

В экстремальные пожароопасные сезоны показатель возрастает на порядок величины (6.92–14.50 %). Крупные и массовые пожары на большей части выделенных субрегионов повторяются с периодом не реже 3–5 лет. Этому, вероятно, способствуют складывающиеся в современных условиях закономерности глобальной циркуляции атмосферы и соответствующие погодные условия – длительные засушливые периоды с высокой температурой воздуха, отсутствие или перераспределение осадков в течение сезона. Возрастание числа пожаров в границах локальных территорий может быть следствием описываемых характерных устойчивых антициклонических процессов (Бышев и др., 2014; Пonomarev В. И. и др., 2015), длительность которых отражается на сезонной динамике показателя пожарной опасности по условиям погоды ПВ-1. Это наблюдается как для Сибири (Швиденко, Щепашенко, 2013; Shvidenko, Schepaschenko, 2013; Валендик и др., 2014; Valendik et al., 2014), так и для других регионов мира (Hayasaka et al., 2016).

В ряде субрегионов Сибири, в частности в Эвенкии, Забайкалье и Якутии, экстремальная пожароопасная обстановка с начала XXI в. повторяется регулярно. Как показывает статистическая обработка данных, значимых трендов динамики длительности пожароопасного периода в Сибири не прослеживается. Присутствует лишь явная корреляция ($r = 0.98$) широтного градиента фактической длительности пожаро-

опасного сезона с одним из основных геофизических параметров – приходящей солнечной радиацией (Федоров, 2015) (рис. 4, *а*). Ранее проведенный анализ (Kharuk et al., 2008, 2011, 2013; Ponomarev et al., 2016) показал, что в современных условиях широтная вариация межпожарных интервалов (МПИ) с продвижением на север возрастает от 80–90 лет на широте 62° с. ш. до 200 лет на широте Северного полярного круга. Такие оценки сопоставимы с данными по МПИ (до 180 лет), приводимыми в публикациях для лесов запада Канады (de Groot et al., 2013). При этом в Сибири в зоне северной границы сомкнутых лиственных древостоев (71° с. ш.) значения МПИ могут достигать 300 лет.

Обобщая имеющиеся данные, можно говорить о значимой связи величины МПИ с широтной вариацией геофизического параметра инсоляции, которая характеризуется коэффициентами корреляции на уровне $r = -0.95$ (рис. 4, *б*).

Временной интервал инструментальных спутниковых наблюдений во всем мире по самым оптимистическим подсчетам составляет 30–40 лет, что явно недостаточно для выявления цикличности и глобального прогнозирования на основе только этих рядов данных о пожарах. Однако, если рассматривать длительную хронологию пожаров в целом, основываясь на доступных экспериментальных и литературных данных, то можно отметить, что похолодание в Малом ледниковом периоде сопровождалось возрастанием величины МПИ, а последовавшее потепление в середине XIX в. – его сокращением (Kharuk et al., 2008, 2013), что в целом согла-

суется с гипотезой тесной связи МПИ с уровнем и вариациями солнечной постоянной.

Можно обозначить важный круг задач, где дистанционные данные сегодняшнего уровня позволяют существенно повысить степень информативности и точности решений. В частности, результаты обработки спутниковых данных необходимы для построения адаптированных алгоритмов прогнозирования динамики пожаров и оценок эмиссий углерода при пожарах переменной интенсивности. Оценки прямых эмиссий углерода в процессе горения растительности традиционно выполняются по методике W. Seiler, P. J. Crutzen (1980): $C = A \times B \times f_c \times \beta$, где A – площадь, пройденная огнем; B – количество биомассы до пожара, т/га; f_c – коэффициент, определяющий долю углерода в сгорающей биомассе; β – коэффициент полноты сгорания. В этом простом соотношении, которое используется в большинстве оценок и прогнозов пожарных эмиссий во всем мире, на сегодня все параметры фактически являются неизвестными. Имеющиеся экспериментальные данные требуют обобщения и экстраполяции с привлечением дистанционных съемок растительности и пожаров. Дифференцированный учет фактического количества сгоревших растительных материалов (в том числе важнейшего параметра – коэффициента полноты сгорания) возможен на основе решения обратной задачи для данных о дистанционно регистрируемой мощности теплоизлучения FRP от активной зоны пожара. В работе M. J. Wooster (2002) показано, что мощность теплоизлучения, детектируемая в среднем инфракрасном диапазоне, линейно связана с количеством сгоревшей биомассы. Данная методика успешно адаптирована для пожаров в лесах Сибири и в настоящее время активно используется на практике, в анализе и оперативном мониторинге (Ponomarev, 2013; Пономарев и др., 2017). Подход дифференцированного учета участков пожара, соответствующих переменной интенсивности и стадиям развития, позволяет прогнозировать повышение точности оценок пожарных эмиссий не менее чем на 25–30 %.

Экспериментально полученные значения мощности теплоизлучения с единицы площади пожара в зависимости от внешних условий и типа горючего материала составляют 28–750 кВт/м² (Конев, 1977; Валендик, Косов, 2008), а при верховых пожарах высокой интенсивности – до 5000–60 000 кВт/м² (Stocks, Hartley, 1995). Вычисляемые на единицу площади активной зоны значения при обработке данных для пикселя

изображения Terra/MODIS (1000 × 1000 м) в среднем будут ниже на 3 порядка за счет неопределенности результатов субпиксельного анализа при выделении зоны активного горения на изображении. Более 90 % всех активных пикселей из базы данных пожаров имели величину FRP в пределах 10–300 Вт/м² (Швецов, Пономарев, 2015; Shvetsov, Ponomarev, 2015) с учетом фактической доли активного горения в пределах пикселя.

Для пожаров в лесах Сибири выявлены пределы вариации показателя FRP для различных типов и видов пожаров, развивающихся в различных условиях и в различных типах леса (Ponomarev, 2013; Швецов, Пономарев, 2015; Shvetsov, Ponomarev, 2015). Следует отметить, что интегральное теплоизлучение от полигона пожара, варьирующее в широком диапазоне 1200–75 000 МВт, связано, прежде всего, с большими площадями пожаров в Сибири. Средние значения показателя FRP (интегральные значения для полигонов пожаров) зафиксированы на уровне 1200–4500 МВт. Спорадические максимумы для пожаров в сосняках достигали 10 000–12 000 МВт. В лиственных насаждениях зафиксированы пожары со значениями FRP более 30 000 МВт, а также спорадические максимумы до 75 000 МВт. Важность и актуальность этих данных прежде всего в том, что на их основе можно классифицировать полигон пожара по интенсивности горения, а после реализации соответствующих моделей – иметь дополнительные сведения о коэффициентах полноты сгорания (β) на протяжении всего времени развития пожара.

В частности, результаты обработки данных за последние 10 лет позволили впервые инструментально зафиксировать долю лесных пожаров Сибири с участками экстремального теплоизлучения. Использованный в таком анализе критерий регистрации пикселей экстремального теплоизлучения FRP_{extr} был не ниже 75 Вт/м². Их доля ежегодно варьирует на уровне $(5.5 \pm 1.2) \%$ (Пономарев и др., 2017). Суммарная площадь лесов, пройденных пожарами высокой энергии, включая верховые, составляла не менее 8.5 % от среднегодовой, а в отдельные годы (например, 2009, 2010, экстремальный сезон 2012) достигала значений 15–25 % суммарной площади пожаров. Регистрируемые экстремальные значения FRP связаны, прежде всего, с фазой максимальной интенсивности горения, что подтверждается результатами сопряженного анализа с информацией о верховых пожарах. Около 65 % случаев

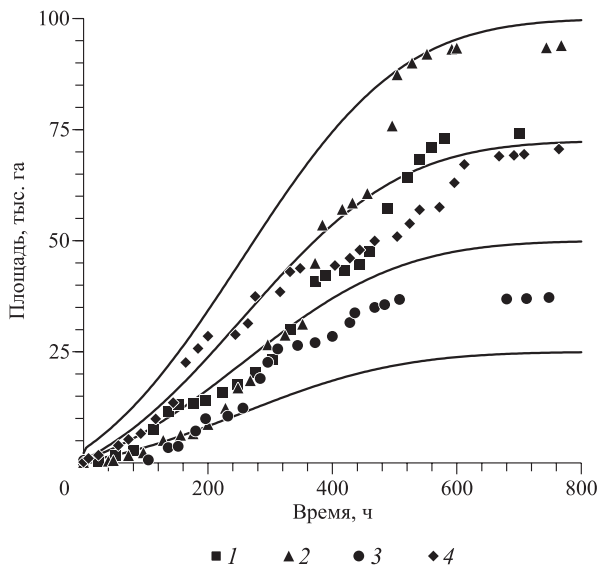


Рис. 5. Семейство модельных кривых динамики приращения площади экстремально крупных пожаров. Условными знаками отображены фактические данные для категории пожаров: 1, 4 – до 75 тыс. га; 2 – до 100 тыс. га; 3 – до 25 тыс. га. По материалам спутникового мониторинга 2016 г., Эвенкия.

верховых лесных пожаров, зафиксированных наземными средствами (данные «Авиалесоохраны»), сопровождалось экстремально высоким FRP, превышающим в 2 раза и более средние значения по пожарному полигону.

Другими актуальными направлениями являются решение задач анализа динамики пожаров и развитие методов прогнозирования характеристик пожаров. На примере выборки из 100 пожаров, действовавших в течение сезона 2016 г. преимущественно в лиственных лесах Эвенкии, получены и обобщены предельные модельные кривые динамики прироста тактических элементов и площади пожара от времени (рис. 5).

Моделирование развития пожара – задача несколько многофакторная, настолько и не решенная на сегодняшний момент. Любая модель требует валидации на основе фактических данных для различных классов объектов и различных внешних условий, а информационное обеспечение такими материалами оперативного дистанционного мониторинга на сегодняшний день уже подготовлено.

Выполнена оценка характерных временных интервалов, необходимых для реализации определенной стадии пожара. Так, начальная стадия занимает 70–120 ч, стадия экспоненциального роста площади имеет характерное время в пределах 150–275 ч, далее в течение 45–65 ч, как правило, наблюдается логарифмическое затуха-

ние скорости приращения площади. Полученные показатели имеют большие вариации значений, а дисперсия достигает 40 % от абсолютных значений.

Однако, как можно видеть на рис. 5, динамика площади пожара может быть спрогнозирована для любого момента времени, так как интервал допустимых значений определен и ограничен модельными кривыми, близкими по виду к функции нормального распределения. Следует отметить, что полученные временные интервалы и модельные кривые, описывающие предельные значения динамики приращения площади, справедливы для случаев пожаров, развивающихся в естественных условиях в отсутствие пожаротушения.

Предложенные подходы позволяют расширить пределы применимости дистанционных данных для оценки характеристик пожара, в том числе энергетических параметров и интенсивности, что необходимо для последующего решения обратной задачи дистанционного определения объема сгорающих горючих материалов и количественных оценок пожарных эмиссий. Инструментальные измерения такого рода с достаточной регулярностью и точностью возможны исключительно с использованием дистанционных методов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для понимания фундаментальных пожарных процессов, имеющих планетарный масштаб (формирование условий для экстремальных пожарных режимов в условиях меняющегося климата, глобальный бюджет углерода, пожарные эмиссии), критически важен дифференциальный учет вклада пожаров Сибири. Роль дистанционных средств контроля и сбора инструментальных данных в этом смысле нельзя недооценивать. Внедрение новых технологий дистанционного контроля характеристик пожаров, воздействия на растительность и эмиссий углерода имеет перспективы быть реализованным в самое ближайшее время, так как существующие системы спутникового мониторинга, включая сегмент российской космической программы, постоянно модернизируются.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности в рамках научного проекта № 17-41-240475_p_a.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барталев С. А., Ершов Д. В., Коровин Г. Н., Котельников Р. В., Луян Е. А., Щетинский В. Е. Информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства РФ (состояние и перспективы развития) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. II. С. 419–429.
- Барталев С. А., Стыценок Ф. В., Егоров В. А., Луян Е. А. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.
- Бышев В. И., Нейман В. Г., Пономарев В. И., Романов Ю. А., Серых И. В., Цурикова Т. В. Роль глобальной атмосферной осцилляции в формировании климатических аномалий Дальневосточного региона России // ДАН. 2014. Т. 458. № 1. С. 92–96.
- Ваганов Е. А., Фуряев В. В., Сухинин А. И. Пожары сибирской тайги // Природа. 1998. № 7. С. 51–62.
- Валендик Э. Н., Иванова Г. А. Пожарные режимы в лесах Сибири и Дальнего Востока // Лесоведение. 2001. № 4. С. 69–73.
- Валендик Э. Н., Кисляхов Е. К., Рыжкова В. А., Пономарев Е. И., Данилова И. В. Крупные пожары в таежных ландшафтах Центральной Сибири // География и природ. ресурсы. 2014. № 1. С. 52–59.
- Валендик Э. Н., Косов И. В. Тепловое излучение лесных пожаров и возможное воздействие его на древостой // Хвойные бореальной зоны. 2008. Т. XXV. № 1–2. С. 88–92.
- Конев Э. В. Физические основы горения растительных материалов. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1977. 240 с.
- Кудрин А. Ю., Резников В. М. Аэрокосмическая система мониторинга пожарной обстановки // Технол. гражданск. безопасн. 2006. Т. 3. № 4. С. 56–61.
- Пономарев В. И., Дмитриева Е. В., Шкорба С. П. Особенности климатических режимов в северной части Азиатско-Тихоокеанского региона // Системы контроля окружающей среды. 2015. № 1(21). С. 67–72.
- Пономарев Е. И., Харук В. И. Горимость лесов Алтае-Саянского региона в условиях наблюдаемых изменений климата // Сиб. экол. журн. 2016. № 1. С. 38–46.
- Пономарев Е. И., Швецов Е. Г. Характеристики категорий пожаров растительности в Сибири по данным спутниковых и других наблюдений // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 5. С. 45–54.
- Пономарев Е. И., Швецов Е. Г., Усатая Ю. О. Регистрация энергетических характеристик пожаров в лесах Сибири дистанционными средствами // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 4. С. 3–11.
- Сухинин А. И. Система космического мониторинга лесных пожаров в Красноярском крае // Сиб. экол. журн. 1996. Т. 3. № 1. С. 85–92.
- Федоров В. М. Широкие соответствия в распределении приходящей солнечной радиации и общей циркуляции атмосферы // Сложные системы. 2015. № 1(14). С. 39–55.
- Швецов Е. Г., Пономарев Е. И. Оценка влияния внешних условий на мощность теплоизлучения от лесных пожаров по данным спутникового мониторинга // Сиб. экол. журн. 2015. № 3. С. 413–421.
- Швиденко А. З., Щепаченко Д. Г. Климатические изменения и лесные пожары в России // Лесоведение. 2013. № 5. С. 50–61.
- Шерстюков Б. Г., Шерстюков А. Б. Оценки тенденций усиления лесных пожаров в России до конца XXI в. по данным сценарных экспериментов климатических моделей пятого поколения // Метеорол. и гидрол. 2014. № 5. С. 17–30.
- Школьник И. М., Мелешко В. П., Ефимов С. В., Стафеева Е. Н. Изменения экстремальности климата на территории Сибири к середине XXI века: ансамблевый прогноз по региональной модели ГГО // Метеорол. и гидрол. 2012. № 2. С. 5–23.
- de Groot W. J., Cantin A. S., Flannigan M. D., Soja A. J., Gowman L. M., Newbery A. A comparison of Canadian and Russian boreal forest fire regimes // For. Ecol. Manag. 2013. V. 294. P. 23–34.
- Dennison P. E., Brewer S. C., Arnold J. D., Moritz M. A. Large wildfire trends in the western United States, 1984–2011 // Geophys. Res. Lett. 2014. V. 41. Iss. 8. P. 2928–2933.
- Flannigan M., Stocks B., Turetsky M., Wotton M. Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest // Glob. Change Biol. 2009. V. 15. Iss. 3. P. 549–560.
- Forkel M., Thonicke K., Beer C., Cramer W., Bartalev S., Schmullius C. Extreme fire events are related to previous-year surface moisture conditions in permafrost-underlain larch forests of Siberia // Environ. Res. Lett. 2012. V. 7. N. 4. P. 1–9.
- Giglio L. MODIS Collection 5 Active Fire Product User's Guide. Version 2.5. Dpt. Geogr. Sci., Univ. Maryland, MD, USA, 2013. 61 p.
- Giglio L., Descloitres J., Justice C. O., Kaufman Y. J. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS // Rem. Sens. Environ. 2003. V. 87. Iss. 2–3. P. 273–282.
- Hayasaka H., Tanaka H. L., Bieniek P. A. Synoptic-scale fire weather conditions in Alaska // Polar Sci. 2016. V. 10. Iss. 3. P. 217–226.

- IPCC, 2014: Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Summaries, frequently asked questions, and cross-chapter boxes. A contribution of Working Group II to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change / C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. March, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, and L. L. White (Eds.). World Meteorol. Org., Geneva, Switzerland, 2014. 190 p. (in Arabic, Chinese, English, French, Russian, and Spanish).
- Justice C., Giglio L., Boschetti L., Roy D., Csiszar I., Morisette J., Kaufman Y. Modis Fire Products (Version 2.3, 1 Oct. 2006) (EOS ID N. 2741) Algorithm Technical Background Document, Modis Data, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA, 2006. 34 p.
- Kasischke E. S., Verbyla D. L., Rupp T. S., McGuire A. D., Murphy K. A., Jandt R., Barnes J. L., Hoy E. E., Duffy P. A., Calef M., Turetsky M. R. Alaska's changing fire regime – implications for the vulnerability of its boreal forests // *Can. J. For. Res.* 2010. V. 40. N. 7. P. 1313–1324.
- Kharuk V. I., Dvinskaya M. L., Ranson K. J. Fire return intervals within the northern boundary of the larch forest in Central Siberia // *Int. J. Wildland Fire.* 2013. V. 22. N. 2. P. 207–211.
- Kharuk V. I., Ranson K. J., Dvinskaya M. L. Wildfires dynamic in the larch dominance zone // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. Iss. 1. P. 1–6.
- Kharuk V. I., Ranson K. J., Dvinskaya M. L., Im S. T. Wildfires in northern Siberian larch dominated communities // *Environ. Res. Lett.* 2011. V. 6. N. 4. 045208. P. 1–6.
- 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. V. 9. N. 10. 105007. P. 1–8.
- LAADS DAAC – NASA (The Level-1 and Atmosphere Archive and Distribution System (LAADS) Distributed Active Archive Center (DAAC), NASA Goddard Space Flight Center). Greenbelt, Maryland, USA, 2017.
- Lenton T. M., Held H., Kriegler E., Hall J. W., Lucht W., Rahmstorf S., Schellnhuber H. J. Tipping elements in the Earth's climate system // *PNAS.* 2008. V. 105. N. 6. P. 1786–1793.
- Loupian E. A., Mazurov A. A., Flitman E. V., Ershov D. V., Korovin G. N., Novik V. P., Abushenko N. A., Altyntsev D. A., Koshelev V. V., Tashchilin S. A., Tatarnikov A. V., Csiszar I., Sukhinin A. I., Ponomarev E. I., Afonin S. V., Belov V. V., Matvienko G. G., Loboda T. Satellite monitoring of forest fires in Russia at federal and regional levels // *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change.* 2006. V. 11. Iss. 1. P. 113–145.
- Ponomarev E. I. Radiative power of wildfires in Siberia on the basis of TERRA/Modis imagery processing // *Folia Forestalia Polonica. Series A – Forestry.* 2013. V. 55. Iss. 2. P. 102–110.
- Ponomarev E. I., Kharuk V. I. Wildfire occurrence in forests of the Altai–Sayan region under current climate changes // *Contemp. Probl. Ecol.* 2016. V. 9. N. 1. P. 29–36 (Original Russian text © E. I. Ponomarev, V. I. Kharuk, 2016, publ. in *Sibirskii Ekologicheskii Zhurnal.* 2016. N. 1. P. 38–46).
- Ponomarev E. I., Kharuk V. I., Ranson K. J. Wildfires dynamics in Siberian larch forests // *Forests.* 2016. V. 7. Iss. 6. 125. P. 1–9.
- Rehfeldt G. E., Crookston N. L., Sáenz-Romero C., Campbell E. M. North American vegetation model for land-use planning in a changing climate: a solution to large classification problems // *Ecol. Appl.* 2012. V. 22. Iss. 1. P. 119–141.
- Seiler W., Crutzen P. J. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning // *Climatic Change.* 1980. V. 2. Iss. 3. P. 207–247.
- Shvetsov E. G., Ponomarev E. I. Estimating the influence of external environmental factors on fire radiative power using satellite imagery // *Contemp. Probl. Ecol.* 2015. V. 8. Iss. 3. P. 337–343 (Original Russian text © E. G. Shvetsov, E. I. Ponomarev, 2015, publ. in *Sibirskii Ekologicheskii Zhurnal.* 2015. N. 3. P. 413–421).
- Shvidenko A. Z., Schepaschenko D. G. Climate change and wildfires in Russia // *Contemp. Probl. Ecol.* 2013. V. 6. Iss. 7. P. 683–692 (Original Russian text © A. Z. Shvidenko, D. G. Schepaschenko, 2013, publ. in *Lesovedenie.* 2013. N. 5. P. 50–61).
- Stocks B. J., Hartley G. R. Fire behavior in three jack pine fuel complexes. *Nat. Res. Can., Can. For. Serv. Publ., Great Lakes Forestry Centre, Sault Ste. Marie, Ontario, Canada, 1995. 16 p.*
- Valendik E. N., Kisilyakhov E. K., Ryzhkova V. A., Ponomarev E. I., Danilova I. V. Conflagration fires in taiga landscapes of Central Siberia // *Geogr. Nat. Res.* 2014. V. 35. Iss. 1. P. 41–47 (Original Rus. text © E. N. Valendik, E. K. Kisilyakhov, V. A. Ryzhkova, E. I. Ponomarev, I. V. Danilova, 2014, publ. in *Geography and Natural Resources.* 2014. V. 35. N. 1. P. 52–59).
- Wooster M. J. Small-scale experimental testing of fire radiative energy for quantifying mass combusted in natural vegetation fires // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. Iss. 21. 2027. P. 231–234.

CURRENT RESULTS AND PERSPECTIVES OF WILDFIRE SATELLITE MONITORING IN SIBERIA

E. I. Ponomarev^{1,2}, V. I. Kharuk^{1,2}, N. D. Yakimov²

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

² *Siberian Federal University
Prospekt Svobodny, 79, Krasnoyarsk, 660041 Russian Federation*

E-mail: evg@ksc.krasn.ru, kharuk@ksc.krasn.ru, nyakimov96@mail.ru

In the paper we summarized the data on wildfires in Siberian forests that was obtained on the basis of long-term (1996–2016) satellite monitoring. Wildfire geospatial analysis is presented and main characteristics of fires are generalized and interpreted for current conditions in Siberian forests. It is shown the growth trend of burning of Siberian forests during the 20-year monitoring period. At the same time, the latitudinal variation of fires, as well as the fire danger period and the fire return interval correlates with the gradient of the main geophysical characteristic such as the incoming solar radiation. Remote sensing data were used to validate the adapted technology for estimating the energy characteristics of burning and to classify the fires of variable intensity. The technology for FRP (Fire Radiative Power) estimation was applied successfully to control extreme intensity or crown wildfires. Instrumental estimation for total annual area of extreme wildfires is at least 8.5 %, and it can reach 15–25 %. The adapted algorithms for predicting the dynamics of variable intensity fires is discussed. The typical times were evaluated for the stages of fire dynamics and the model curves were figured out for the limits of area increment. In addition, the characteristics of the satellite systems used (NOAA/AVHRR, Terra, Aqua/MODIS, Suomi NPP/VIIRS, Landsat-8 OLI, Sentinel-2), were discussed, including Russian segment (Resource-P), which are promising for increasing effectiveness of wildfire satellite monitoring in Siberia.

Keywords: *satellite data, wildfire, fire return interval, geospatial analysis, fire radiative power, insolation.*

How to cite: *Ponomarev E. I., Kharuk V. I., Yakimov N. D. Current results and perspectives of wildfire satellite monitoring in Siberia // Sibirskij Lesnoj Zurnal (Sib. J. For. Sci.). 2017. N. 5: 25–36 (in Russian with English abstract).*