Методология мониторинга и прогнозирования пирогенной гибели лесов на основе данных спутниковых наблюдений

С. А. Барталев, Ф. В. Стыценко, С. А. Хвостиков, Е. А. Лупян

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: smis@smis.iki.rssi.ru

Несмотря на значительное количество и площади природных пожаров в нашей стране, наносимый ими социально-экономический и экологический урон, знания о масштабах пирогенной гибели лесов до недавнего времени оставались крайне фрагментарными. В последние годы, благодаря полномасштабному применению методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса, открылась возможность регулярной оценки пирогенных повреждений лесов на всей территории страны. Это позволило создать ежегодно обновляемую многолетнюю базу геопространственных данных о повреждениях пожарами лесов России, выявить с её использованием новые количественные закономерности их пирогенной гибели, создать методическую основу для непрерывного инструментального мониторинга последствий воздействия огня на лесные экосистемы страны. Охватывающая к настоящему времени период 2006–2017 гг. база данных является уникальным источником информации для построения моделей пирогенной гибели лесов в зависимости от условий горения и сопутствующих природных факторов. Наличие такого рода моделей, в свою очередь, открывает принципиально новые возможности разработки методов прогнозирования пирогенной гибели лесов, как важнейшего элемента информационной поддержки процессов принятия решений в современной системе охраны лесов России от пожаров.

Приведённые в статье научные сведения указывают на значительную пространственно-временную вариабельность показателей пирогенного воздействия на леса России, наличие трендов пожарных режимов, а также на выраженные сезонные закономерности вероятности гибели насаждений различных древесных пород. На основе установленных закономерностей предложена новая методология вероятностного прогнозирования и оперативной оценки пирогенной гибели лесов. Получаемые прогнозы и оценки гибели лесов демонстрируют достаточно высокий уровень оправдываемости, позволяя их использовать при принятии решений о целесообразности тушения пожаров и планирования постпожарных лесохозяйственных мероприятий.

Ключевые слова: пожары, пирогенная гибель лесов, дистанционное зондирование, мониторинг, прогнозирование

Одобрена к печати: 15.12.2017
DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-6-176-193

Введение

Природные пожары — глобальный феномен, с которым человечество сталкивается на протяжении всей истории своего существования. Вместе с тем, лишь в последние десятилетия применение методов дистанционного зонирования Земли (ДЗЗ) из космоса открыло по-настоящему широкие возможности исследования природных пожаров как географического явления, характеризуемого своими пространственно-временными особенностями, закономерностями ландшафтной приуроченности, связями с социально-экономическими, климатическими и другими факторами.

К настоящему времени на основе использования методов ДЗЗ в мире созданы глобальные банки многолетних данных о географическом положении, времени обнаружения и других характеристиках природных пожаров, таких как пройденная огнём площадь, радиационная температура и энергетическая мощность теплового излучения в процессе горения (Arino et al., 2005; Giglio et al., 2006; Justice et al., 2006). Использование методов ДЗЗ уже на протяжении многих лет является неотъемлемой составляющей повседневной практики организации противопожарной охраны лесов России (Абушенко и др., 1998; Коровин и др., 1998; Loupian et al., 2006; Sukhinin et al., 2005). Технологической основной поддержки оперативного управления охраной от пожаров лесов нашей страны в настоящее время служит Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства РФ (ИСДМ-Рослесхоз) (Барталев и др., 2008; Лупян и др., 2015а).

Рис. 1. Сравнение ежегодной площади пирогенной гибели лесов по данным официальной статистики и спутникового мониторинга

Вместе с тем, несмотря на значительные успехи решения задач дистанционного обнаружения и мониторинга действующих пожаров (Пономарев и др., 2017; Стыценко и др., 2016), картографирования и оценки пройденной огнём площади (Барталев и др., 2012; Егоров и др., 2006; Bartalev et al., 2007), имеющиеся данные о масштабах и степени разрушительного воздействия пожаров на леса до недавнего времени оставались крайне фрагментарными. Это наглядно подтверждает сравнение представленных на *рис. 1* данных о ежегодной динамике площади погибших от пожаров лесов России, полученных по материалам Федеральной службы государственной статистики (Охрана окружающей среды..., 2017) и по данным ДЗЗ с использованием методов, разработанных в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) (Барталев и др., 2015; Стыценко и др., 2013).

Следующий из приведённых на *рис. 1* графиков вывод о многократном занижении официальных данных о площади пирогенной гибели лесов России, свидетельствует о крайне низкой эффективности проводимых до настоящего времени органами лесного хозяйства обследований повреждённых огнём насаждений. Одновременно это указывает на настоятельную необходимость широкого применения в практике лесопатологического мониторинга повреждённых пожарами лесов наиболее современных методов и технологий ДЗЗ, способных обеспечить кардинальное повышение полноты охвата пройденных огнём территорий страны при обеспечении регулярности и своевременности сбора информации. Полученные нами по результатам спутникового мониторинга данные о фактических масштабах пирогенной гибели лесов наглядно подтверждают представления о пожарах как наиболее мощном факторе разрушительного воздействия на лесные ресурсы и экосистемы России. При этом обращает на себя внимание чрезвычайно высокая, превышающая один порядок, межгодовая вариабельность площади погибших от пожаров лесов России (от $0{,}57 \cdot 10^6$ до $6{,}67 \cdot 10^6$ га) и наличие выраженного положительного многолетнего тренда, характеризуемого величиной среднегодового темпа её нарастания $0{,}178 \cdot 10^6$ га·год$^{-1}$.

Созданная на основе результатов спутниковых наблюдений спектрорадиометром MODIS пройденных огнём территорий база геопространственных данных о пирогенных повреждениях лесов (Барталев и др., 2015; Стыценко и др., 2013) охватывает всю территорию России за период 2006–2017 гг. и ежегодно обновляется. Эти уникальные по своей полноте и репрезентативности данные спутниковой оценки фактических масштабов пирогенной гибели лесов страны способны внести значительный вклад в решение практических задач их охраны и защиты, использования и воспроизводства, проведение фундаментальных исследований

биосферы. Они впервые позволили получить достоверную информацию о площади пирогенной гибели лесов в масштабах страны, исследовать её сезонную изменчивость с учётом различий породной структуры повреждённых огнём насаждений (Барталев и др., 2015).

Вместе с тем, получаемые в настоящее время на основе методов ДЗЗ ежегодные оценки пирогенной гибели лесов приурочены к окончанию пожароопасного сезона, что позволяет их рассматривать, прежде всего, в качестве материалов постпожарной инвентаризации насаждений. При этом эффективное выполнение целого ряда функций охраны и защиты лесов требует заблаговременного получения прогностической информации об их потенциальных пирогенных повреждениях для оперативного принятия превентивных мер и решений о целесообразности тушения действующих очагов горения, планирования лесопользования и лесосанитарных мероприятий на пройденных огнём территориях. Получение такого рода прогностической информации о потенциальных повреждениях лесов пожарами требует разработки и применения соответствующей методологии, способной обеспечить получение адекватных оценок на основе ограниченного набора данных, которые могут быть получены в максимально короткие сроки.

Накопленный и регулярно пополняемый с использованием данных спутникового радиометра MODIS временной ряд дистанционных оценок степени пирогенных повреждений и гибели лесов России содержит обширнейшую информацию, обеспечивающую новые возможности развития методов мониторинга и прогнозирования воздействия пожаров на лесные экосистемы. Наличие столь продолжительного временного ряда данных создаёт уникальную основу для исследований закономерностей пирогенной гибели лесов и разработки новых подходов к её прогнозированию на основе комплексирования данных дистанционных наблюдений со статистическими и эвристическими моделями.

Настоящая статья представляет новые методические решения и экспериментальные результаты, направленные на развитие возможностей мониторинга и прогнозирования пирогенной гибели лесов на основе данных спутниковых наблюдений и моделирования.

Концептуальные положения методологии спутникового мониторинга и прогнозирования пирогенной гибели лесов

Концептуальная основа методологии спутникового мониторинга и прогнозирования пирогенной гибели лесов формируется сочетанием следующих тесно связанных и взаимно дополняющих компонентов (*рис. 2*):

- *спутниковые данные ДЗЗ* различного пространственного и временного разрешения и *методы их обработки*, позволяющие детектировать очаги и осуществлять мониторинг развития действующих лесных пожаров, картографировать пройденные огнём территории и оценивать степень пирогенных повреждений лесов;
- *модель развития действующего пожара*, позволяющая прогнозировать положение его фронта с учётом местоположения выявленных по данным ДЗЗ очагов горения, текущих и ожидаемых метеоусловий, пространственного распределения природных горючих материалов, рельефа местности;
- *статистическая модель вероятностного прогнозирования пирогенной гибели лесов* в зависимости от повреждённой огнём древесной породы и календарной даты воздействия пожара.

Согласно предложенной концепции, в зависимости от решаемых задач, прогнозирование или инструментальное определение пирогенной гибели лесов может осуществляться с применением необходимого сочетания различных данных ДЗЗ и прогнозных моделей на трёх последовательных фазах, отличающихся требованиями к допустимой величине временного лага и уровню достоверности получаемых результатов, а именно:

- оперативное прогнозирование пирогенной гибели лесов на этапе действия пожара (*фаза оперативного прогнозирования*);

- прогнозирование пирогенной гибели лесов непосредственно после окончания пожара (*фаза постпожарного прогнозирования*);
- инструментальная оценка фактической пирогенной гибели лесов (*фаза постпожарной оценки*).

Организация спутникового мониторинга и прогнозирования пирогенной гибели лесов полностью согласуется с общей логикой комплексирования в ИСДМ-Рослесхоз данных ДЗЗ трёх различных уровней пространственного разрешения и периодичности наблюдений (Барталев и др., 2012; Лупян и др., 2015а).

Фаза оперативного прогнозирования пирогенной гибели лесов необходима, прежде всего, для определения потенциального вреда от пожаров с целью принятия обоснованных решений о целесообразности их тушения. Существующий опыт (Хвостиков и др. 2012) демонстрирует возможность оперативного прогнозирования динамики пожаров на основе имитационной модели их развития и данных спутникового детектирования очагов горения. В основе прогнозирования динамики пожаров лежит использование результатов детектирования очагов горения по данным ДЗЗ, преимущественно получаемых в настоящее время спутниковыми системами низкого пространственного разрешения, такими как MODIS и VIIRS. Результаты детектирования очагов горения позволяют оценить их местоположение в момент съёмки, начиная с которого осуществляется прогноз развития пожара, а регулярно получаемые данные ДЗЗ обеспечивают возможность корректировки положения фронта огня по мере его развития, не допуская накопления ошибок моделирования. Прогнозное местоположение контура пожара на заданную дату позволяет ограничить область последующего применения статистической модели пирогенной гибели лесов с учётом пространственного распределения различных древесных пород.

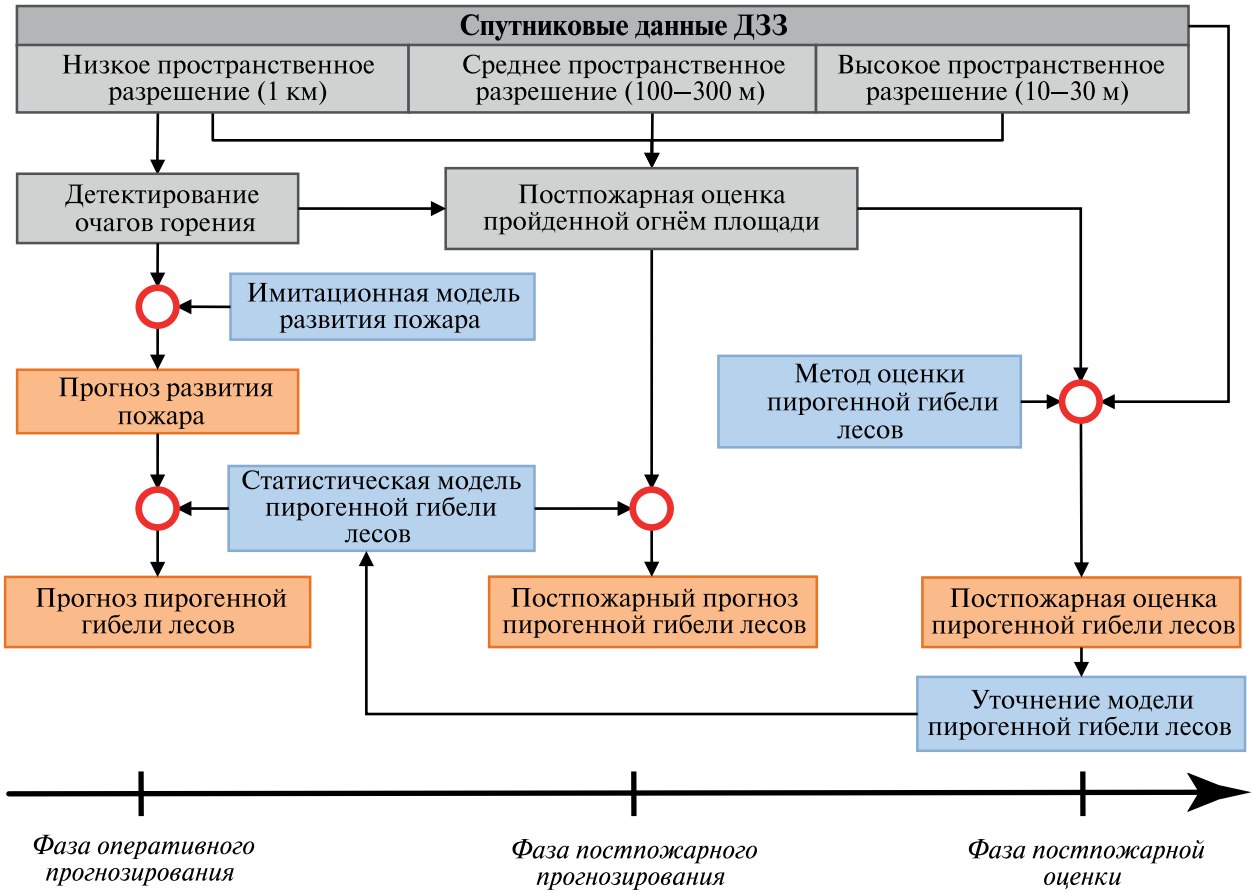

Рис. 2. Концептуальная схема методологии прогнозирования и мониторинга пирогенной гибели лесов

Фаза постпожарного прогнозирования пирогенной гибели лесов служит целям получения информации, необходимой, прежде всего, для своевременного планирования мероприятий по использованию, защите и восстановлению повреждённых огнём насаждений. Для этого статистическая модель пирогенной гибели лесов применяется к фактически пройденной огнём территории согласно результатам её картографирования по данным ДЗЗ наиболее высокого на текущий момент пространственного разрешения. В целом, сравнение результатов оперативного и постпожарного прогнозирования пирогенной гибели лесов позволяет характеризовать последние более высоким уровнем достоверности получаемой информации при одновременном увеличении и временного лага её поступления.

Фаза постпожарной оценки пирогенной гибели лесов служит целям получения фактических данных для организации и проведения мероприятий по использованию, защите и восстановлению повреждённых насаждений, проведения лесопатологического мониторинга в интересах выработки стратегий устойчивого управления лесами, проведения фундаментальных и прикладных научных исследований. На этом этапе оценка пирогенных повреждений лесов осуществляется методами обработки данных ДЗЗ среднего и высокого пространственного разрешения (Стыценко и др., 2013) с привлечением при необходимости материалов выборочных наземных обследований. В сравнении с результатами обоих этапов прогнозирования пирогенной гибели лесов, фаза их постпожарной оценки характеризуется наиболее высоким уровнем достоверности при наибольшей временной задержке получения информации. Полученные на данном этапе данные служат, в частности, основой для дальнейшего развития статистических моделей пирогенной гибели лесов.

Метод и результаты мониторинга пирогенной гибели лесов

Физическую основу оценку пирогенных повреждений лесов на основе данных ДЗЗ составляют вызываемые пожарами изменения их отражательной способности в видимом, ближнем и среднем инфракрасном (ИК) диапазонах спектра, прежде всего, на длинах волн, соответствующих линиям поглощения света молекулами хлорофилла и воды (Дейвис и др., 1983; Кронберг, 1988; Gao, 1996). Изменения отражательной способности лесов в наибольшей степени проявляются при их гибели, сопровождаемой характерной для верховых и высокоинтенсивных низовых пожаров полной потерей деревьями вегетативных органов. Существенное влияние на снижение альбедо погибших древостоев может оказывать и уменьшение проективного покрытия крон деревьев при одновременном повышении относительного вклада покрытой продуктами пиролиза поверхности в отражённое излучение. Приведённые физические предпосылки составляют основу взаимосвязей между степенью повреждения лесов пожарами и спектральными индексами, основанными на дистанционных измерениях их отражательной способности в видимом, ближнем и среднем ИК-диапазонах. Одним из наиболее информативных показателей для спутникового мониторинга пожаров и их последствий является коротковолновый вегетационный индекс SWVI (Gao, 1996), вычисляемый следующим образом:

$$\mathrm{SWVI} = \frac{R_{nir} - R_{swir}}{R_{nir} + R_{swir}},$$

где R_{nir} и R_{swir} — значения коэффициента отражения поверхности в ближнем и среднем ИК-диапазонах длин волн соответственно.

Обнаружена также высокая информативность разностных индексов (Воробьев и др., 2014; Epting et al., 2005; Hoy et al., 2008; Isaev et al., 2002; Murphy et al., 2008), вычисляемых с использованием значений спектральных вегетационных индексов лесного покрова до и после пожара.

Проведённые авторами (Барталев и др., 2010) исследования позволили обнаружить близкую к линейной тесную взаимосвязь между принятым в лесном хозяйстве показателем средневзвешенной категории состояния (СКС) (Руководство по проведению..., 2007) и относительным разностным вегетационным индексом RdSWVI, рассчитываемым как:

$$\mathrm{RdSWVI} = \frac{\mathrm{SWVI}_{pre} - \mathrm{SWVI}_{post}}{\sqrt{\mathrm{SWVI}_{pre} + 1}}.$$

Описанные предпосылки составили основу разработки авторами метода дистанционной оценки пирогенной гибели лесов в масштабах страны с использованием данных спектрорадиометра MODIS (Барталев и др., 2015; Стыценко и др., 2013).

Метод дистанционной оценки степени повреждения лесов пожарами основан на использовании данных ежедневных измерений их отражательной способности спектрорадиометром MODIS, в том числе, в ближнем (858 нм) и среднем (1640 нм) ИК-каналах, и экспериментально установленной зависимости между значениями показателя СКС и спектрального индекса RdSWVI. Методом также предусматривается использование полученных на основе данных MODIS ежегодно обновляемых карт растительного покрова России (Барталев и др., 2016) и результатов ежедневного детектирования пройденных огнём территорий (Барталев и др., 2012).

Оценка степени повреждения лесов пожарами выполняется на основе сравнения многолетней статистической нормы временных рядов SWVI и значений индекса в период с момента выявления пожара до окончания свободных от влияния снега спутниковых наблюдений в текущем году. На *рис. 3* представлен пример временной серии среднемноголетней динамики M^N_{SWVI} и стандартного отклонения σ^N_{SWVI} индекса SWVI, а также его значений повреждённого пожаром леса и полученного на их основе индекса RdSWVI. В поведении RdSWVI после пожара наблюдается рост с достижением максимума и некоторым последующим снижением значений, что объясняется фенологически обусловленным падением среднемноголетней нормы SWVI.

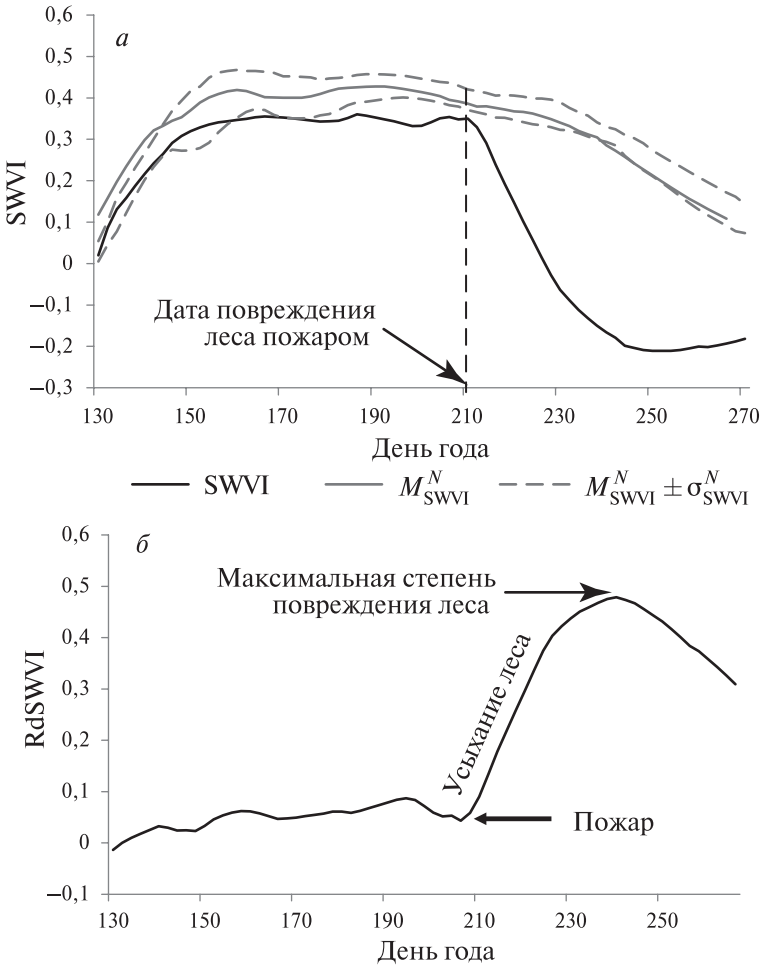

Рис. 3. Примеры сезонной динамики SWVI (*а*) и RdSWVI (*б*) повреждённого пожаром леса. Динамика SWVI дана в сравнении со среднемноголетней нормой индекса

Метод включает нахождение максимума RdSWVI за вегетационный сезон после даты обнаружения пожара с последующим расчётом значения СКС на основе экспериментально построенного уравнения. Использование величины постпожарного максимума вегетационного индекса для оценки значений показателя СКС лесов обусловлено постулатом нереверсивности динамики их пирогенного усыхания в текущем сезоне. При этом оценка выполняется только для пожаров, демонстрирующих устойчивые изменения.

Метод предусматривает фильтрацию участков неустойчивого проявления повреждений лесов, необходимость которой обусловлена наличием отличных от пожаров факторов, вызывающих отклонения SWVI от статистической нормы. К числу факторов такого рода можно отнести повреждения низовыми пожарами низкой интенсивности напочвенного покрова, а также аномальные метеорологические условия. Такого рода отклонения, как правило, носят краткосрочный характер, в то время как пирогенные усыхания древостоев проявляются в более устойчивых изменениях. Характерные примеры устойчивого и неустойчивого отклонения динамики SWVI от своей статистической нормы представлены на *рис. 4*.

Для выделения повреждённых пожарами лесов с наличием устойчивых изменений метод предусматривает получение разновременного индекса $SWVI_{DEV}$, представляющего собой интегрированную по времени характеристику изменений спектрально-отражательных свойств лесов (Стыценко и др., 2013). Данная характеристика отражает интегральную величину падения индекса SWVI, выраженную в количестве стандартных отклонений. Оценка значений показателя СКС на основе величины постпожарного максимума RdSWVI выполняется только для лесов с устойчивым проявлением повреждений на основе критерия $SWVI_{DEV} > P$, где P — экспериментально установленное пороговое значение (*рис. 5*).

Использование разработанного метода дало возможность построить временной ряд цифровых карт пирогенных повреждений лесов России с пространственным разрешением 230 м за период 2006–2017 гг. (*рис. 6*).

Представленные в *таблице* данные о распределении повреждённых пожарами лесов по категориям состояния позволяют получить оценку средней площади ежегодной пирогенной гибели лесов, составившую величину около $2{,}43 \cdot 10^6$ га·год$^{-1}$. Полученная величина включает леса, отнесённые к категориям погибших и усыхающих с потерей более 2/3 ассимиляционного аппарата крон деревьев.

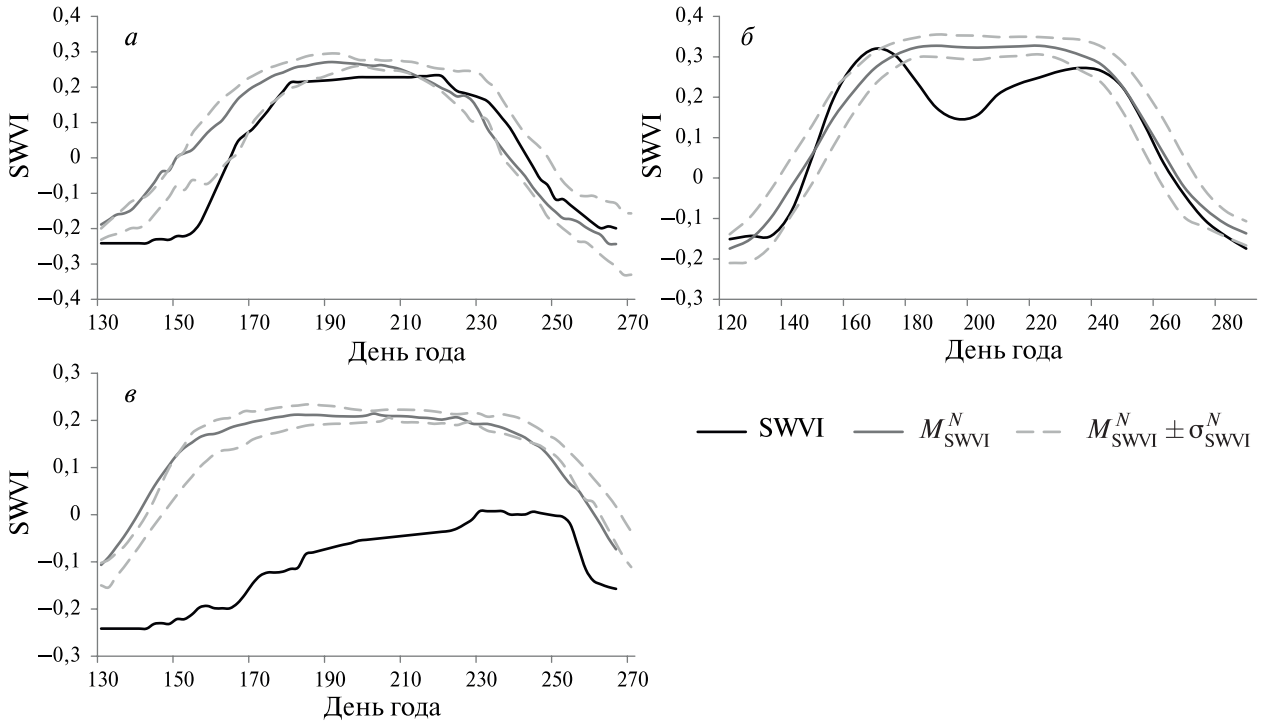

Рис. 4. Примеры сезонной динамики SWVI пройденных пожарами лесов с неустойчивым (*а*, *б*) и устойчивым (*в*) отклонением от статистической нормы

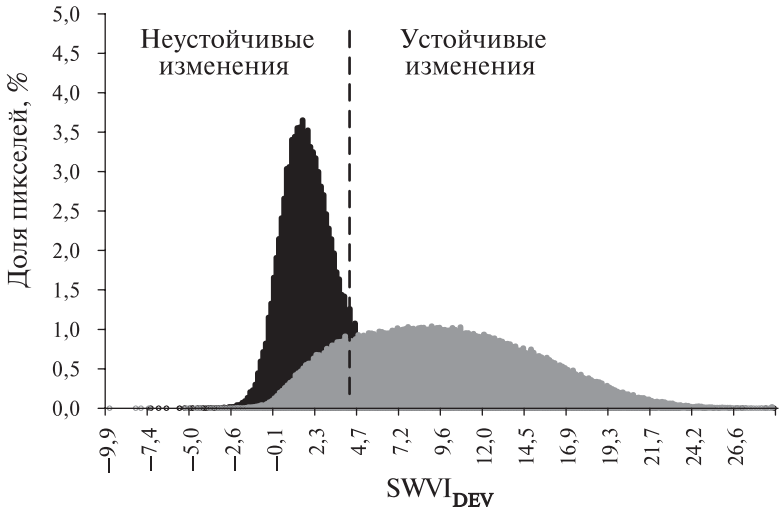

Рис. 5. Распределение значений $SWVI_{DEV}$ для устойчивых и неустойчивых пирогенных изменений лесов

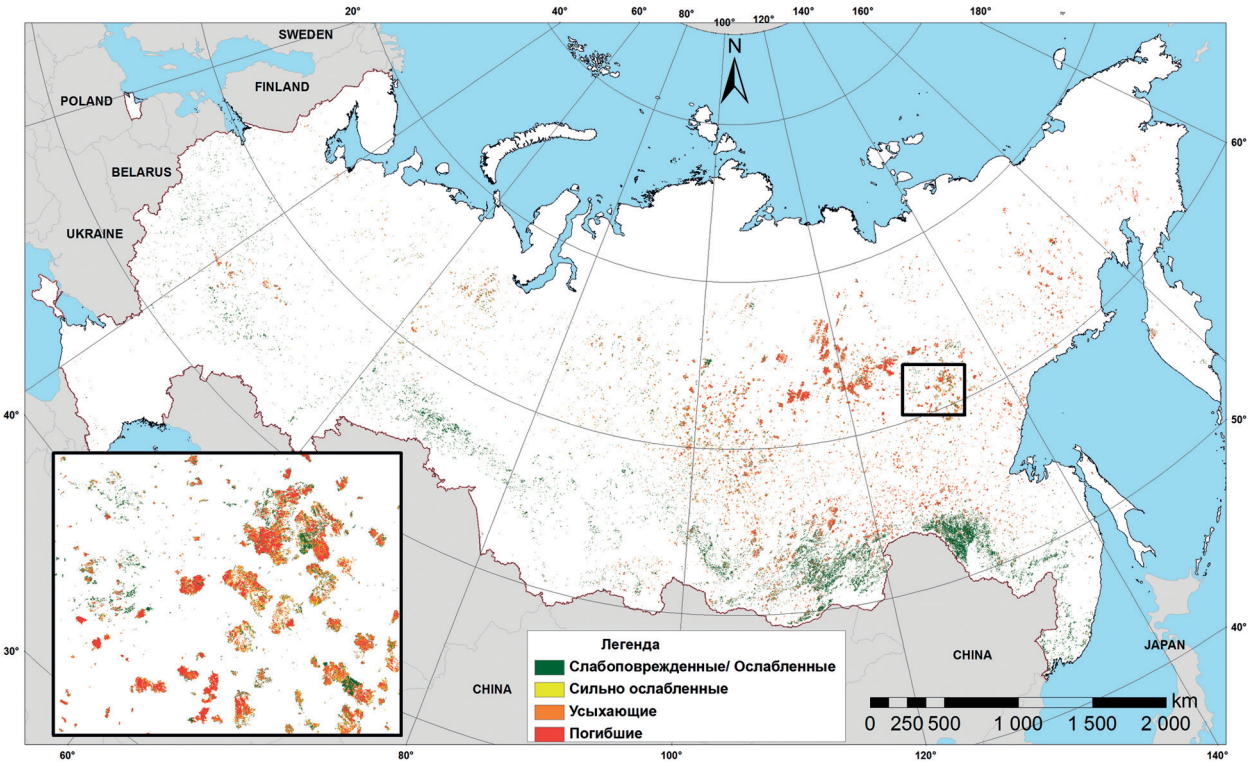

Рис. 6. Карта пирогенных повреждений лесов России в 2006–2017 гг.

Оценка площади повреждённых пожарами лесов России по категориям состояния

Год	Площади лесов различных категорий состояния, тыс. га			
	неповреждённые и ослабленные	сильно ослабленные	усыхающие	погибшие
2006	2148,7	143,4	536,4	1295,1
2007	1109,6	108,2	239,6	334,1
2008	6223,3	232,8	848,0	1608,0
2009	2333,4	177,8	530,2	901,9
2010	1112,0	237,5	462,0	1019,2
2011	1427,7	336,6	982,9	1364,7

Окончание таблицы

Год	Площади лесов различных категорий состояния, тыс. га			
	неповреждённые и ослабленные	сильно ослабленные	усыхающие	погибшие
2012	3424,2	942,8	3042,1	3632,6
2013	976,4	223,2	802,7	1464,4
2014	1248,9	256,2	1083,2	2033,4
2015	2141,3	141,5	599,1	1128,9
2016	2848,3	381,4	1189,6	1859,1
2017	1131,7	233,3	729,1	1435,8
В среднем в год	2177,1	284,5	920,4	1506,4
%	44,54	5,82	18,83	30,81

Согласно полученным данным общая площадь погибших в 2006–2017 гг. лесов составила около $29{,}1 \cdot 10^6$ га. Межгодовые вариации пирогенной гибели лесов характеризуется достижением максимальной величины в 2012 г., отмеченным экстремальным уровнем горимости. Доля погибших лесов от пройденной огнём их площади колеблется в различные годы в диапазоне от 27,6 до 67,4 %, а её среднемноголетняя величина составляет 49,6 %.

Анализ полученных данных позволил установить наличие выраженной сезонной динамики пройденной огнём площади и пирогенной гибели лесов России (*рис. 7*). Среднемноголетняя сезонная динамика пройденной огнём площади характеризуется достижением максимума в августе, а возникающие в этом месяце пожары затрагивают около 24,5 % повреждаемой за год площади лесов. Высокий уровень горимости характерен в целом для летнего периода, а также апреля и мая. Одновременно следует отметить низкий уровень деструктивного воздействия весенних пожаров, приводящих к гибели лесов на 13,3 % пройденной огнём территории. Максимальные повреждения лесам причиняют пожары, возникающие в июле и сопровождаемые гибелью до 77 % пройденных огнём насаждений.

Оценка доли пирогенной гибели лесов в общей пройденной огнём площади отдельных древесных пород может служить в качестве критерия их пожароустойчивости. Сравнительный анализ полученных значений указанного критерия позволяет прийти к заключению, что наименьшим уровнем пожароустойчивости характеризуются леса темнохвойных пород, около 63 % площади которых погибают в результате воздействия огня.

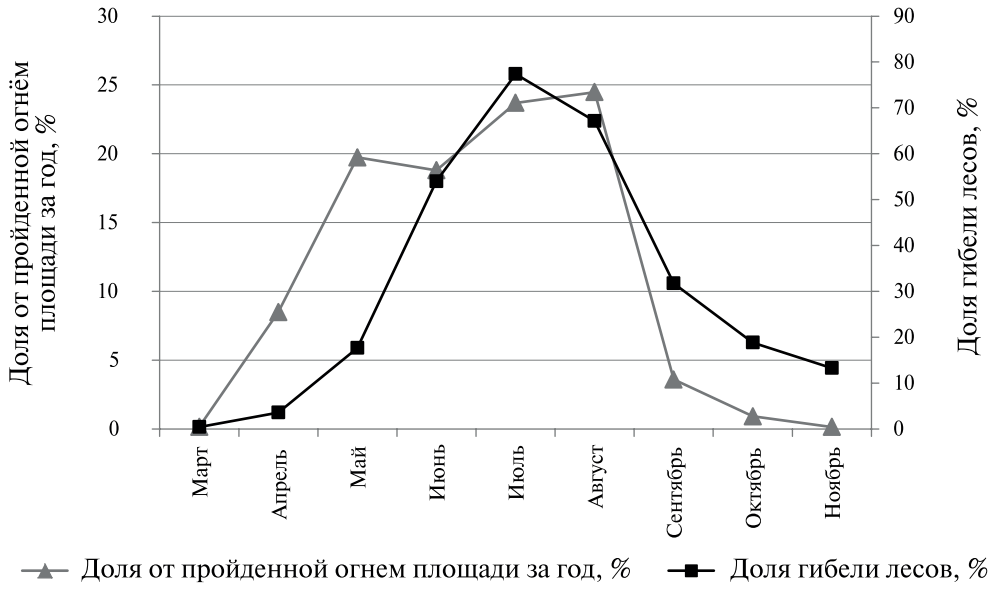

Рис. 7. Среднемноголетняя сезонная динамика пирогенных повреждений и гибели лесов России

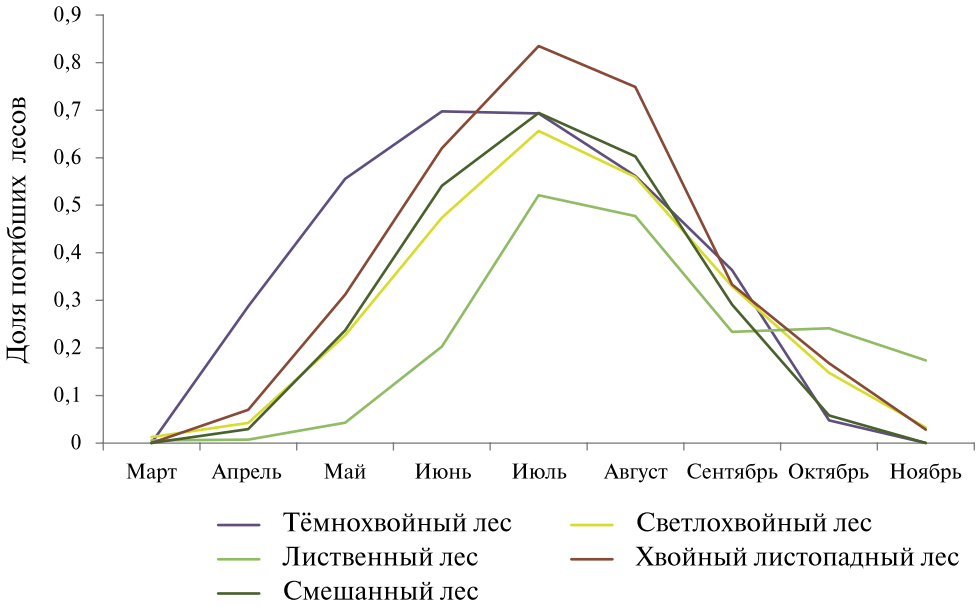

Рис. 8. Среднемноголетняя сезонная динамика пирогенной гибели лесов в зависимости от их принадлежности к различным группам древесных пород

Леса группы лиственных пород, согласно полученным результатам, могут быть отнесены к категории пожароустойчивых лесов, воздействие огня на которые в среднем приводит к гибели лишь на 13% площади. Достаточно высокое разрушительное воздействие пожары оказывают на светлохвойные леса, приводя к гибели лиственничников и сосняков на 59 и 44% пройденной огнём площади.

Выполненный анализ показал, что доля погибших насаждений от пройденной огнём площади для разных пород имеет выраженную сезонную динамику с достижением максимума в июле и низкими значениями для весенних и осенних пожаров (*рис. 8*). Полученные эмпирические сезонные зависимости вероятностей пирогенной гибели лесов различной породной структуры могут быть использованы для построения статистических моделей в интересах оперативного прогнозирования.

Оперативное прогнозирование пирогенной гибели лесов на основе имитационной модели развития пожара и данных ДЗЗ

Для определения потенциального вреда от пожаров и принятия решения о целесообразности их тушения необходимо осуществлять оперативное прогнозирование пирогенной гибели лесов. Имитационное моделирование развития пожара служит основой оперативного прогнозирования, предоставляя возможность построения заблаговременного прогноза динамики распространения огня. В системе ИСДМ-Рослесхоз (Лупян и др., 2015а) реализована модель развития пожара, на примере которой показана возможность прогнозирования пирогенной гибели лесов. Модель подробно описана в ранее опубликованных работах, например, (Хвостиков и др., 2012), а общая схема моделирования представлена на *рис. 9*.

Для имитации развития пожара модель оценивает состояние горючих материалов на основе многодневных временных рядов метеорологических данных. Используя информацию о состоянии горючих материалов, скорости и направлении ветра модель оценивает фронтовую, боковую и тыловую скорость распространения огня. Модель исходит из предположения об эллипсовидной форме прироста пожара, а характеристики эллипса однозначно задаются скоростями распространения пожара. Дополнительно модель вводит ряд коррекций скорости, характеризующих рельеф и возможность возникновения верхового пожара.

Моделирование развития пожара осуществляется на регулярной сетке, размер которой зависит от разрешения спутниковых данных и доступных вычислительных возможностей. Оперативные спутниковые данные задают области активного горения на сетке, для каждой

клетки в состоянии активного горения с помощью модели строится эллипс. Модель воспроизводит возгорание новых клеток сетки и распространение огня от них по ходу развития пожара. Проведённые исследования показали, что модель позволяет адекватно прогнозировать динамику пожаров на территории России (Хвостиков и др., 2012). Примеры результатов моделирования представлены на *рис. 10.*

Для решения задачи прогнозирования динамики действующих пожаров необходимо обеспечить оперативное получение данных об условиях горения, что достигается с помощью интеграции модели в систему ИСДМ-Рослесхоз. Модель использует спутниковые данные об области активного горения, типах горючих материалов и рельефе, а также прогнозную метеорологическую информацию.

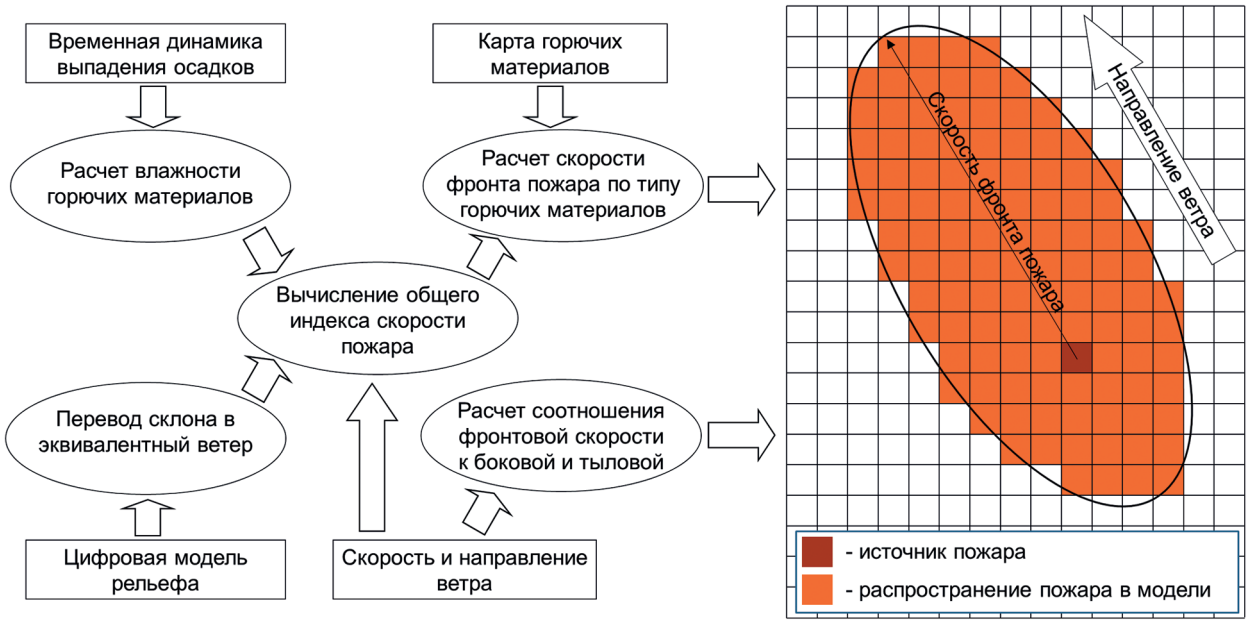

Рис. 9. Общая схема моделирования развития пожара

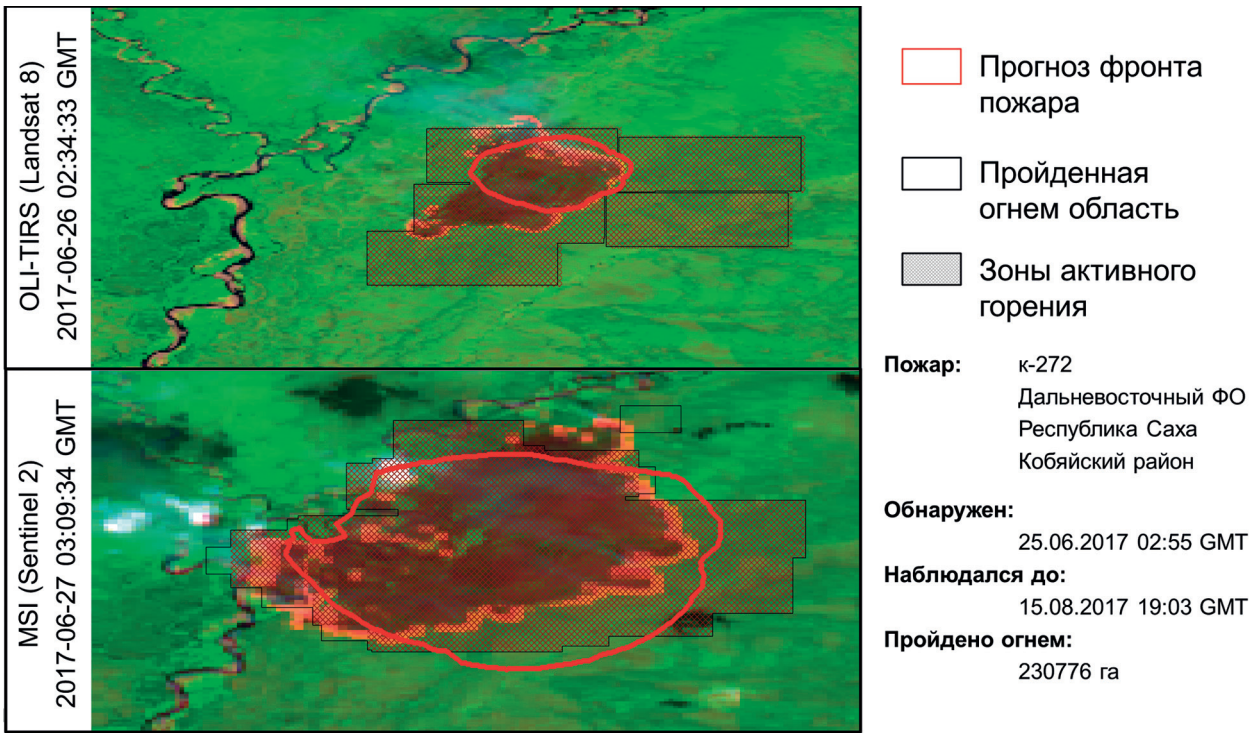

Рис. 10. Сравнение результатов прогнозирования развития пожара с фактическим фронтом горения по данным спутниковых наблюдений

Описанная модель формирует основу для оперативного прогнозирования пирогенной гибели лесов. Подход состоит из следующих трёх этапов: получение спутниковой информации о текущем положении фронта пожара, осуществление прогнозирования его динамики на краткосрочный период с помощью имитационной модели и прогнозных метеоданных, получение прогностической оценки площади погибших лесов. Оценка пирогенной гибели лесов основывается на прогнозной площади прироста пожара и статистических распределениях вероятности гибели лесов от пожаров.

Оценка оправдываемости прогнозов пирогенной гибели лесов

Оценка оправдываемости прогнозов пирогенной гибели лесов была выполнена с использованием архива исторических данных о динамике пожаров, произошедших с 2011 по 2016 г. в Сибирском и Дальневосточном регионах РФ. Были выбраны пожары, для которых не проводились мероприятия по тушению, площадь которых превышала 500 га, и время горения составляло не менее трёх дней. Всего было выбрано 1637 пожаров, для которых с помощью модели осуществлено 15 700 суточных прогнозов развития огня. Выполненная оценка оправдываемости включала оценку имитационной модели развития пожара, а также статистической модели пирогенной гибели лесов.

Анализ показал, что модель развития пожара способна адекватно прогнозировать площадь, пройденную огнём, и гибель лесов на уровне отдельных пожаров. Коэффициент корреляции между модельной и спутниковой оценкой площадей, пройденных огнём, составил 0,66, для гибели лесов он равен 0,61 (*рис. 11*). В среднем для модели наблюдается небольшая недооценка площади прироста пожара на 15 % (средняя площадь 690 га по модели и 810 га по факту). При этом модель переоценивает среднюю площадь пирогенной гибели лесов на 30 % (400 га по модели и 310 га по факту).

Стоит отметить, что погрешность модели на уровне каждого пожара не обязательно имеет систематический характер. При агрегации модельных и спутниковых оценок за весь период горения пожара степень их совпадения возрастёт. Для площади, пройденной огнём, коэффициент корреляции составляет 0,84, а для площади погибших лесов — 0,78 (*рис. 12*). Таким образом, в среднем модель адекватно оценивает динамику развития пожара и пирогенную гибель.

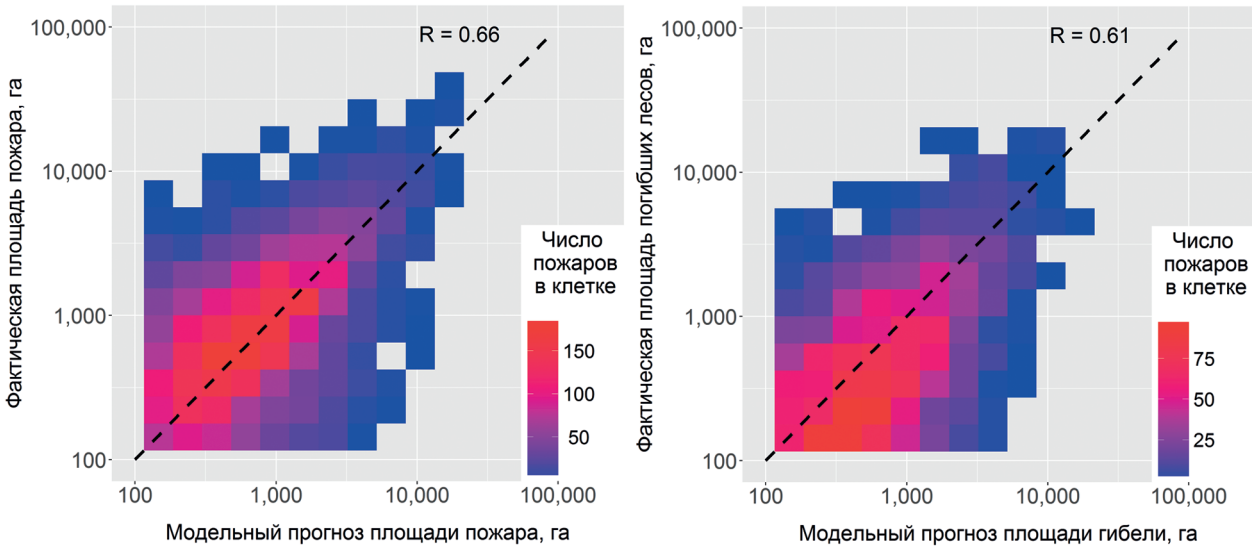

Рис. 11. Сравнение модельной оценки прироста площади пожара и гибели лесов с фактическим данными спутникового мониторинга на основе суточных прогнозов развития огня (логарифмическая шкала)

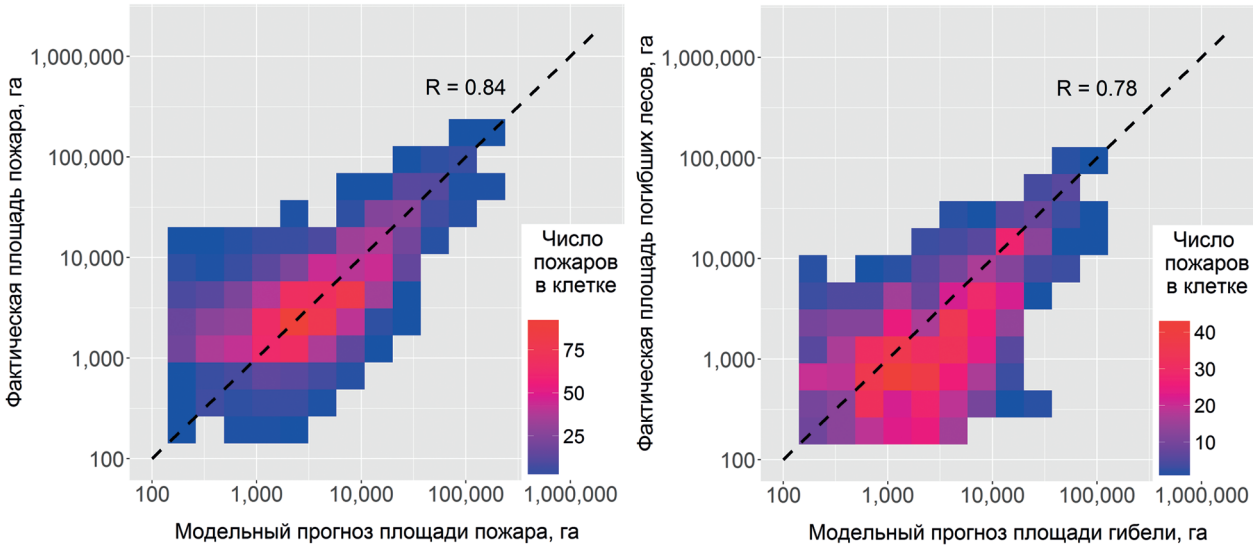

Рис. 12. Сравнение модельных оценок и фактических данных, суммированных за весь период горения пожара (логарифмическая шкала)

Была также выполнена оценка достоверности постпожарного прогноза пирогенной гибели лесов, который основывается на использовании фактической информации о пройденной огнём площади. На *рис. 13* представлено сопоставление результатов прогноза пирогенной гибели лесов, полученной сразу после его завершения с оценкой, полученной при достижении максимального значения индекса RdSWVI. Значение коэффициента корреляции $R = 0{,}89$ демонстрирует существенное увеличение точности оценки по сравнению с результатами оперативного прогнозирования пирогенной гибели лесов (см. *рис. 12*). В среднем, для постпожарного прогноза наблюдается переоценка площади пирогенной гибели лесов на 19 %.

Проведённый анализ оправдываемости прогностических оценок показывает принципиальную возможность использования предложенного подхода для решения задач оперативного и постпожарного прогнозирования пирогенной гибели лесов.

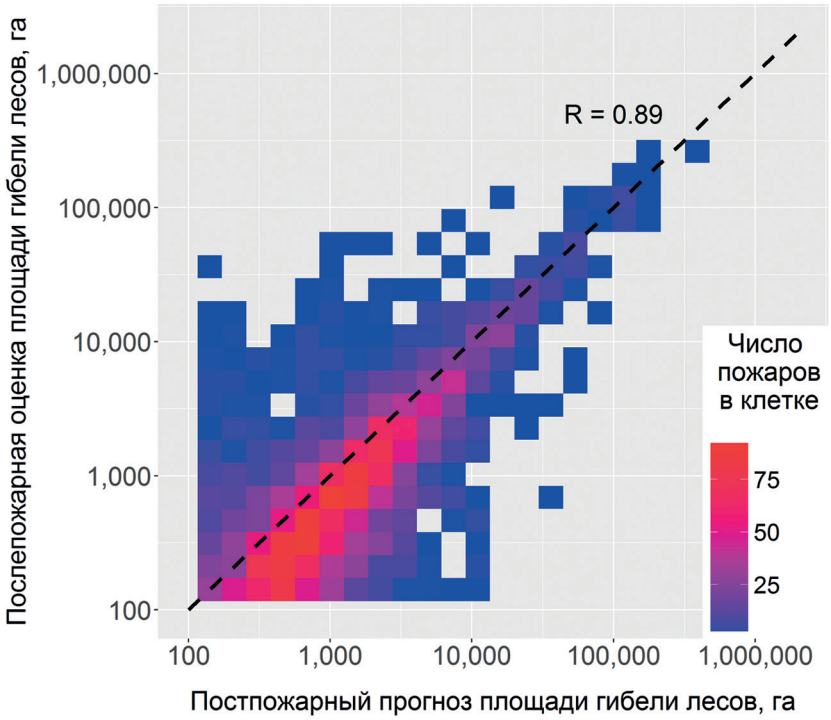

Рис. 13. Сравнение постпожарного прогноза и постпожарной оценки пирогенной гибели лесов в результате воздействия отдельных пожаров

Заключение

Благодаря полномасштабному применению методов ДЗЗ из космоса в настоящее время имеется возможность регулярной оценки пирогенных повреждений лесов на территории страны. Это позволило создать ежегодно обновляемую многолетнюю базу геопространственных данных о повреждениях пожарами лесов России, выявить с её использованием новые количественные закономерности их пирогенной гибели, создать методическую основу для непрерывного мониторинга последствий воздействия огня на лесные экосистемы. Охватывающая к настоящему времени период 2006–2017 гг. база данных является уникальным источником информации для построения моделей пирогенной гибели лесов в зависимости от условий горения и сопутствующих природных факторов. Наличие такого рода моделей, в свою очередь, открывает принципиально новые возможности разработки методов прогнозирования пирогенной гибели лесов как важнейшего элемента информационной поддержки процессов принятия решений в современной системе охраны лесов России от пожаров.

Приведённые в статье сведения указывают на значительную пространственно-временную вариабельность пирогенного воздействия на леса России, наличие трендов пожарных режимов, а также выраженные сезонные закономерности вероятности гибели насаждений различных древесных пород. На основе установленных закономерностей предложена новая методология мониторинга и прогнозирования пирогенной гибели лесов, основанная на комплексном использовании спутниковых данных ДЗЗ различного пространственного и временного разрешения, имитационной модели развития действующих пожаров и статистической модели вероятностного прогнозирования пирогенной гибели лесов в зависимости от повреждённой огнём древесной породы и календарной даты воздействия пожара.

Согласно предложенной методологии, в зависимости от решаемых задач прогнозирование или инструментальное определение пирогенной гибели лесов может осуществляться с применением необходимого сочетания различных данных ДЗЗ и прогнозных моделей на трёх последовательных фазах, отличающихся требованиями к допустимой величине временного лага и уровню достоверности получаемых результатов.

Получаемые прогнозы и оценки гибели лесов демонстрируют достаточно высокий уровень оправдываемости, позволяя использовать их при принятии решений о целесообразности тушения пожаров и планирования постпожарных лесохозяйственных мероприятий.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (Государственный контракт 14.607.21.0122, уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI60715X0122) с использованием возможностей Центра коллективного пользования «ИКИ-мониторинг» (Лупян и др., 2015б).

Литература

1. *Абушенко Н. А.*, *Барталев С. А.*, *Беляев А. И.*, *Ершов Д. В.*, *Захаров М. Ю.*, *Коровин Г. Н.*, *Кошелев В. В.*, *Крашенинникова Ю. С.*, *Лупян Е. А.*, *Мазуров А. А.*, *Минько Н. П.*, *Назиров Р. Р.*, *Семенов С. М.*, *Тащилин С. А.*, *Флитман Е. В.*, *Щетинский В. Е.* Опыт и перспективы организации оперативного спутникового мониторинга территории России в целях службы пожароохраны лесов // Исследование Земли из космоса. 1998. № 3. С. 89–95.
2. *Барталев С. А.*, *Ершов Д. В.*, *Коровин Г. Н.*, *Котельников Р. В.*, *Лупян 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. 2. С. 419–429.
3. *Барталев С. А.*, *Егоров В. А.*, *Крылов А. М.*, *Стыценко Ф. В.*, *Ховратович Т. С.* Исследование возможностей оценки состояния поврежденных пожарами лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 215–225.
4. *Барталев С. А.*, *Егоров В. А.*, *Ефремов В. Ю.*, *Лупян Е. А.*, *Стыценко Ф. В.*, *Флитман Е. В.* Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 9–27.

5. *Барталев С. А.*, *Стыценко Ф. В.*, *Егоров В. А.*, *Лупян Е. А.* Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.
6. *Барталев С. А.*, *Егоров В. А.*, *Жарко В. О.*, *Лупян Е. А.*, *Плотников Д. Е.*, *Хвостиков С. А.*, *Шабанов Н. В.* Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
7. *Воробьев О. Н. Курбанов Э. А.*, *Лежнин С. А.*, *Полевщикова Ю. А.*, *Демишева Е. Н.* Методика выявления степени повреждения древостоев после пожаров 2010 года в Среднем Поволжье // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 217–229.
8. *Дейвис Ш. М.*, *Ландгребе Д. А.*, *Ланженлауб Д. С.*, *Сиева Р. Ф.*, *Свейн Ф. Х.*, *Филлипс Т. Л.*, *Хоффер Р. М.* Дистанционное зондирование: количественный подход / под ред. Ф. Свейна, Ш. Дейвис; пер. с англ. М.: Недра, 1983. 415 с.
9. *Егоров В. А.*, *Барталев С. А.*, *Лупян Е. А.*, *Уваров И. А.* Мониторинг повреждений растительного покрова пожарами по данным спутниковых наблюдений // Известия вузов: геодезия и аэрофотосъемка. 2006. Вып. 2. С. 98–109.
10. *Коровин Г. Н.*, *Барталев С. А.*, *Беляев А. И.* Интегрированная система мониторинга лесных пожаров // Лесное хоз-во, 1998. № 4. С. 45–48.
11. *Кронберг П.* Дистанционное изучение Земли: Основы и методы дистанционных исследований в геологии: пер. с нем. М.: Мир, 1988. 343 с.
12. *Лупян Е. А.*, *Барталев С. А.*, *Ершов Д. В.*, *Котельников Р. В.*, *Балашов И. В.*, *Бурцев М. А.*, *Егоров В. А.*, *Ефремов В. Ю.*, *Жарко В. О.*, *Ковганко К. А.*, *Колбудаев П. А.*, *Крашенинникова Ю. С.*, *Прошин А. А.*, *Мазуров А. А.*, *Уваров И. А.*, *Стыценко Ф. В.*, *Сычугов И. Г.*, *Флитман Е. В.*, *Хвостиков С. А.*, *Шуляк П. П.* (2015а) Организация работы со спутниковыми данными в информационной системе дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 222–250.
13. *Лупян Е. А.*, *Прошин А. А.*, *Бурцев М. А.*, *Балашов И. В.*, *Барталев С. А.*, *Ефремов В. Ю.*, *Кашницкий А. В.*, *Мазуров А. А.*, *Матвеев А. М.*, *Суднева О. А.*, *Сычугов И. Г.*, *Толпин В. А.*, *Уваров И. А.* (2015б) Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
14. Охрана окружающей среды в России, Федеральная служба государственной статистики. URL: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/publications/catalog/doc_1139919459344 (дата обращения: 23.12.2017).
15. *Пономарев Е. И.*, *Харук В. И.*, *Якимов Н. Д.* Результаты и перспективы спутникового мониторинга природных пожаров Сибири // Сибирский лесной журн. 2017. № 5. С. 25–36.
16. Руководство по проектированию, организации и ведению лесопатологического мониторинга. Утверждено приказом Рослесхоза от 29.12.2007. № 523. URL: http://www.alppp.ru/law/bezopasnost-i-ohrana-pravoporjadka/21/prikaz-rosleshoza-ot-29-12-2007--523.html (дата обращения: 23.10.2017).
17. *Стыценко Ф. В.*, *Барталев С. А.*, *Егоров В. А.*, *Лупян Е. А.* Метод оценки степени повреждения лесов пожарами на основе спутниковых данных MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 254–266.
18. *Стыценко Ф. В.*, *Барталев С. А.*, *Иванова А. А.*, *Лупян Е. А.*, *Сычугов И. Г.* Возможности оценки площадей лесных пожаров в регионах России на основе данных спутникового детектирования активного горения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 6. С. 189–298. DOI:10.21046/2070-7401-2016-13-6-289-298.
19. *Хвостиков С. А.*, *Балашов И. В.*, *Барталев С. А.*, *Ефремов В. Ю.*, *Лупян Е. А.* Региональная оптимизация параметров прогнозной модели природных пожаров и оперативное моделирование динамики их развития с использованием данных спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 3. С. 91–100.
20. *Arino O.*, *Plummer S.*, *Defrenne D.* Fire Disturbance: The ten years time series of the ATSR World Fire Atlas // Proc. MERIS-AATSR Symp. ESA publication. 2005. P. 597.
21. *Bartalev S. A.*, *Egorov V. A.*, *Loupian E. A.*, *Uvarov I. A.* Multi-Year Circumpolar Assessment the Area Burnt in Boreal Ecosystems Using SPOT-Vegetation // Intern. J. Remote Sensing. 2007. V. 28. No. 6. P. 1397–1404.
22. *Epting J.; Verbyla D.; Sorbel B.* Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using Landsat TM and ETM+ // Remote Sensing of Environment. 2005. V. 96. P. 328–339.
23. *Gao B.* NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment. 1996. V. 58. P. 257–266.
24. *Giglio L.*, *Van Der Wer G. R.*, *Randerson J. T.*, *Collatz P. Kasibhatla G. J.* Global estimation of burned area using MODIS active fire observations // Atmospheric Chemistry and Physics. 2006. V. 6. P. 957–974.

25. *Hoy E. E.*, *French N. H.*, *Turetsky M. R.*, *Trigg S. N.*, *Kasischke E. S.* Evaluating the potential of Landsat TM/ETM+ imagery for assessing fire severity in Alaskan black spruce forests // Intern. J. Wildland Fire. 2008. V. 17. P. 500–514.
26. *Isaev A. S.*, *Korovin G. N.*, *Bartalev S. A.*, *Ershov D. V.*, *Janetos A. C.*, *Kasischke E. S.*, *Shugart H. H.*, *French N. H.*, *Orlick B. E.*, *Murphy T. L.* Using Remote Sensing to Assess Russian Forest Fire Carbon Emissions // Climate Change. 2002. V. 55. No. 1-2. P. 235–249.
27. *Justice C.*, *Giglio L.*, *Boschetti L.*, *Roy D.*, *Csiszar I.*, *Morisette J.*, *Kaufman Y.* MODIS Fire Products Algorithm Technical Background Document. Version 2.3. 2006. URL: http://modis-fire.umd.edu/files/atbd_mod14.pdf.
28. *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.
29. *Murphy K. A.*, *Reynolds J. H.*, *Koltun J. M.* Evaluating the ability of the differenced Normalized Burn Ratio (dNBR) to predict ecologically significant burn severity in Alaskan boreal forests // Intern. J. Wildland Fire. 2008. V. 17. P. 490–499.
30. *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.* Satellite-based Mapping of Fires in Russia: New Products for Fire Management and Carbon Cycle Studies // Remote Sensing Environment. 2005. V. 94. P. 428.

Methodology of post-fire tree mortality monitoring and prediction using remote sensing data

S. A. Bartalev, F. V. Stytsenko, S. A. Khvostikov, E. A. Loupian

Space Research Institute RAS, Moscow, 117997, Russia
E-mail: smis@smis.iki.rssi.ru

Until recently knowledge about post-fire tree mortality in Russia was fragmentary and limited, despite significant quantity and area of wildfires in our country and serious ecological and socio-economical damage inflicted by them. Over the last few years widespread implementation of remote sensing methods allowed regular estimation of post-fire tree mortality for the whole territory of Russia. This development made it possible to create a data bank with annual geospatial data on fire severity in the forests of Russia, identify new patterns in associated tree mortality, and form a basis for regular monitoring of post-fire effects on forest ecosystem. This data bank spans the period from 2006 to 2017 and offers unique source of information for the development of new models of fire induced mortality that account for fire conditions and other natural factors. This type of models in turn provides new opportunities to develop methods for prediction of post-fire tree mortality. Predictions provided by those methods can play important part in the decision-making process regarding wildfire protection in Russia. Analysis provided in this paper shows significant spatiotemporal variability in fire-induced changes in forests of Russia, existence of trends in fire regimes, and consistent seasonal patterns in probabilities of post-fire mortality for various tree species. Those patterns form a basis for new methodology of probabilistic prediction and real time estimation of post-fire tree mortality. Predictions and estimates produced by new methodology show high skill, and thus can be used to make decisions about firefighting planning and post-fire management.

Keywords: wildfires, post-fire tree mortality, remote sensing, monitoring, prediction

Accepted: 15.12.2017
DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-6-176-193

References

1. Abushenko N. A., Bartalev S. A., Belyaev A. I., Ershov D. V., Zakharov M. Yu., Korovin G. N., Koshelev V. V., Krasheninnikova Yu. S., Loupian E. A., Mazurov A. A., Min'ko N. P., Nazirov R. R., Semenov S. M., Tashchilin S. A., Flitman E. V., Shchetinskii V. E., Opyt i perspektivy organizatsii operativnogo sputnikovogo monitoringa territorii Rossii v tselyakh sluzhby pozharookhrany lesov (Experience and perspectives of near-realtime satellite monitoring of Russia's territory for the needs of forest fires services), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1998, No 3, pp. 89–95.
2. Bartalev S. A., Egorov V. A., Efremov V. Yu., Loupian E. A., Stytsenko F. V., Flitman E. V., Otsenka ploshchadi pozharov na osnove kompleksirovaniya sputnikovykh dannykh razlichnogo prostranstvennogo razresheniya MODIS i Landsat-TM/ETM+ (Integrated burnt area assessment based on combine use of multi-resolution MODIS and Lansat-TM/ETM+ satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 9–27.
3. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p.
4. Bartalev S. A., Egorov V. A., Krylov A. M., Stytsenko F. V., Khovratovich T. S., Issledovanie vozmozhnostei otsenki sostoyaniya povrezhdennykh pozharami lesov po dannym mnogospektral'nykh sputnikovykh izmerenii (The evaluation of possibilities to assess forest burnt severity using multi-spectral satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, Vol. 7, No 3, pp. 215–225.
5. Bartalev S. A., Ershov D. V., Korovin G. N., Kotel'nikov R. V., Loupian E. A., Shchetinskii V. E., Informatsionnaya sistema distantsionnogo monitoringa lesnykh pozharov Federal'nogo agentstva lesnogo khozyaistva RF (sostoyanie i perspektivy razvitiya) (Forest Fire Satellite Monitoring Information System of Russian Federal Forestry Agency), *Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Vol. 5, No. 2, pp. 419–429.
6. Bartalev S. A., Stytsenko F. V., Egorov V. A., Loupian E. A., Sputnikovaya otsenka gibeli lesov Rossii ot pozharov (Assessment of Russian forest fire mortality using satellite data), *Lesovedenie*, 2015. No. 2. pp. 83–94.
7. Vorob'ev O. N., Kurbanov E. A., Lezhnin S. A., Polevshchikova Yu. A., Demisheva E. N., Metodika vyyavleniya stepeni povrezhdeniya drevostoev posle pozharov 2010 goda v Srednem Povolzh'e (The method of identifying burn severity of disturbed forest stands after wild fires of 2010 in Middle Povolzhje), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 4, pp. 217–229.
8. Deivis Sh. M., Landgrebe D. A., Lanzhenlaub D. S., Sieva R. F., Svein F. Kh., Fillips T. L., Khoffer R. M., *Distantsionnoe zondirovanie: kolichestvennyi podkhod* (Remote sensing, the quantitative approach), Moscow: Nedra, 1983, 415 p.
9. Egorov V. A., Bartalev S. A., Loupian E. A., Uvarov I. A., Monitoring povrezhdenii rastitel'nogo pokrova pozharami po dannym sputnikovykh nablyudenii (Burnt area monitoring using satellite data), *Izvestiya vuzov: geodeziya i aerofotos"emka*, 2006, Vol. 2, pp. 98–109.
10. Korovin G. N., Bartalev S. A., Belyaev A. I., Integrirovannaya sistema monitoringa lesnykh pozharov (Integrated fire monitoring information system), *Lesnoe Khozyaistvo*, 1998, No. 4, pp. 45–48.
11. Kronberg P., Distantsionnoe izuchenie Zemli: *Osnovy i metody distantsionnykh issledovanii v geologii* (Main remote sensing techniques in geology), Moscow: Mir, 1988, 343 p.
12. Loupian E. A., Bartalev S. A., Ershov D. V., Kotel'nikov R. V., Balashov I. V., Burtsev M. A., Egorov V. A., Efremov V. Yu., Zharko V. O., Kovganko K. A., Kolbudaev P. A., Krasheninnikova Yu. S., Proshin A. A., Mazurov A. A., Uvarov I. A., Stytsenko F. V., Sychugov I. G., Flitman E. V., Khvostikov S. A., Shulyak P. P., Organizatsiya raboty so sputnikovymi dannymi v informatsionnoi sisteme distantsionnogo monitoringa lesnykh pozharov Federal'nogo agentstva lesnogo khozyaistva (ISDM-Rosleskhoz).(Satellite data processing management in Forest Fires Remote Monitoring Information System (ISDM-Rosleskhoz) of the Federal Agency for Forestry), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 222–250.
13. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskii A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Tsentr kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh IKI RAN dlya resheniya zadach izucheniya i monitoringa okruzhayushchei sredy (IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284.
14. http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/publications/catalog/doc_1139919459344 (23.12.3017).

15. Ponomarev E. I., Kharuk V. I., Yakimov N. D., Rezul'taty i perspektivy sputnikovogo monitoringa prirodnykh pozharov Sibiri (Current results and perspectives of wildfire satellite monitoring in Siberia), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2017, No. 5, pp. 25–36.
16. http://www.alppp.ru/law/bezopasnost-i-ohrana-pravoporjadka/21/prikaz-rosleshoza-ot-29-12-2007--523.html (accessed 23.10.2017).
17. Stytsenko F. V., Bartalev S. A., Egorov V. A., Loupian E. A., Metod otsenki stepeni povrezhdeniya lesov pozharami na osnove sputnikovykh dannykh MODIS (Post-fire forest tree mortality assessment method using MODIS satellite), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 1, pp. 254–266.
18. Stytsenko F. V., Bartalev S. A., Ivanova A. A., Loupian E. A., Sychugov I. G., Vozmozhnosti otsenki ploshchadei lesnykh pozharov v regionakh Rossii na osnove dannykh sputnikovogo detektirovaniya aktivnogo goreniya (Forest burnt area assessment possibilities in regions of Russia based on active fires detection by satellites), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 6, pp. 189–298.
19. Khvostikov S. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Loupian E. A., Regional'naya optimizatsiya parametrov prognoznoi modeli prirodnykh pozharov i operativnoe modelirovanie dinamiki ikh razvitiya s ispol'zovaniem dannykh sputnikovykh nablyudenii (Regional scale optimization of wildfire model parameters and modeling of wildfaire dynamic using remote sensing data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 3, pp. 91–100.
20. Arino O., Plummer S., Defrenne D., Fire Disturbance: The ten years time series of the ATSR World Fire Atlas, *Proceedings of the MERIS-AATSR Symposium*, 2005, p. 597.
21. Bartalev S. A., Egorov V. A., Loupian E. A., Uvarov I. A., Multi-Year Circumpolar Assessment the Area Burnt in Boreal Ecosystems Using SPOT-Vegetation, *International Journal of Remote Sensing*. 2007, Vol. 28, No. 6, pp. 1397–1404.
22. Epting J., Verbyla D., Sorbel B., Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using Landsat TM and ETM+, *Remote Sensing of Environment*. 2005, Vol. 96, pp. 328–339.
23. Gao B., NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space, *Remote Sensing of Environment*, 1996, Vol. 58, pp. 257–266.
24. Giglio L., Van Der Wer G. R., Randerson J. T., Collatz, P. Kasibhatla G. J., Global estimation of burned area using MODIS active fire observations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, Vol. 6, pp. 957–974.
25. Hoy E. E., French N. H., Turetsky M. R., Trigg S. N., Kasischke E. S., Evaluating the potential of Landsat TM/ETM+ imagery for assessing fire severity in Alaskan black spruce forests, *International Journal of Wildland Fire* 2008, Vol. 17, pp. 500–514.
26. Isaev A. S., Korovin G. N., Bartalev S. A., Ershov D. V., Janetos A. S., Kasischke E. S., Shugart H. H., French N. H., Orlick B. E., Murphy T. L., Using Remote Sensing to Assess Russian Forest Fire Carbon Emissions, *Climate Change*, 2002, Vol. 55, No. 1-2, pp. 235–249.
27. Justice C., Giglio L., Boschetti L., Roy D., Csiszar I., Morisette J., Kaufman Y. *MODIS Fire Products Algorithm Technical Background Document*, Version 2.3, 2006.
28. 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, Vol. 11, pp. 113–145.
29. Murphy K. A., Reynolds J. H., Koltun J. M., Evaluating the ability of the differenced Normalized Burn Ratio (dNBR) to predict ecologically significant burn severity in Alaskan boreal forests, *Intern J. Wildland Fire* 2008, Vol. 17, pp. 490–499.
30. 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. Satellite-based Mapping of Fires in Russia: New Products for Fire Management and Carbon Cycle Studies, *Remote Sensing of Environment*, 2005, Vol. 94, pp. 428.