

УДК 504.064.37+581.524.342

СПУТНИКОВАЯ ОЦЕНКА ГИБЕЛИ ДРЕВОСТОЕВ ОТ ПОЖАРОВ ПО ДАННЫМ О СЕЗОННОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ПРОЙДЕННОЙ ОГНЕМ ПЛОЩАДИ¹

© 2021 г. С. А. Барталев^{a, b, *}, Ф. В. Стыщенко^{a, b}^aИнститут космических исследований РАН, ул. Профсоюзная, 84/32, Москва, 117997 Россия^bЦентр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, ул. Профсоюзная, 84/32, Москва, 117997 Россия

*E-mail: bartalev@d902.iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 17.08.2020 г.

После доработки 16.10.2020 г.

Принята к публикации 08.12.2020 г.

В работе представлены результаты оценки летальности пожаров (доли площади погибших лесов по отношению к общей их площади, затронутой огнем) в лесах России за период 2006–2019 гг. по данным спутниковых наблюдений. Установленная зависимость вероятности пирогенной гибели лесов от времени возникновения и действия огня в течение сезона позволяет рассматривать фактор сезонного распределения площади пожаров в числе информативных предикторов их летальности. Предложенный в статье индекс сезонной летальности лесных пожаров SFLI (Seasonal Fire Lethality Index) позволяет оценивать масштабы пирогенной гибели лесов России на основе получаемой по результатам спутникового мониторинга информации о распределении пройденной огнем площади в течение пожароопасного сезона. Полученные результаты демонстрируют наличие линейной взаимосвязи величины предложенного индекса со значениями показателя летальности лесных пожаров. При этом коэффициент детерминации связи между двумя вышеупомянутыми характеристиками достигает своего максимума ($R^2 = 0.80$) 19 июля, что обуславливает выбор этой календарной даты в качестве кульминационного дня летальности лесных пожаров. Соответствующее этой календарной дате линейное уравнение регрессионной связи между характеристиками летальности воздействия пожаров на леса России обеспечивает возможность ее ежегодной дистанционной оценки со среднеквадратической погрешностью $\pm 10.5\%$. Для оценки летальности лесных пожаров на основе предложенного метода характерны минимальные требования к входным данным, включающим в себя лишь информацию о распределении пройденной огнем площади лесов в течение пожароопасного сезона, что делает возможным его оперативное применение в масштабах страны. Полученные результаты могут иметь непосредственное практическое значение для оптимизации режимов охраны лесов России от пожаров с учетом их потенциальной летальности.

Ключевые слова: лесные пожары, пирогенная гибель лесов, мониторинг лесных пожаров, дистанционное зондирование, индекс сезонной летальности лесных пожаров.

DOI: 10.31857/S0024114821020029

Пожары являются наиболее мощным фактором деструктивного воздействия на леса России и проявляют в настоящее время выраженные тенденции нарастания площади их пирогенных повреждений и гибели (Барталев и др., 2015; Пономарев и др., 2017; Харук, Пономарев, 2020), предположительно связываемые, в том числе, с

изменениями климата (Швиденко, Щепашенко, 2013). Благодаря использованию с конца прошлого века спутниковых данных дистанционного зондирования Земли для мониторинга лесных пожаров России, особенности их географического и сезонного распределения, межгодовая изменчивость числа возникающих очагов горения и пройденной огнем площади к настоящему времени достаточно хорошо изучены (Лупян и др., 2017). Получившие развитие в последние годы методы дистанционной оценки пирогенных повреждений лесов позволили сформировать ежегодно обновляемые многолетние ряды данных о характеристиках их постпожарных усыханий и гибели в масштабах страны (Стыщенко и др., 2013).

¹ Исследования выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда (19-77-30015). При проведении исследований использовалась инфраструктура Центра коллективного пользования “ИКИ-Мониторинг”, развиваемая и поддерживаемая в рамках темы “Мониторинг” (номер госрегистрации 01.20.0.2.00164). Статистическая обработка данных о повреждениях лесов пожарами выполнена в рамках Государственного задания ЦЭПЛ РАН АААА-А18-118052590019-7.

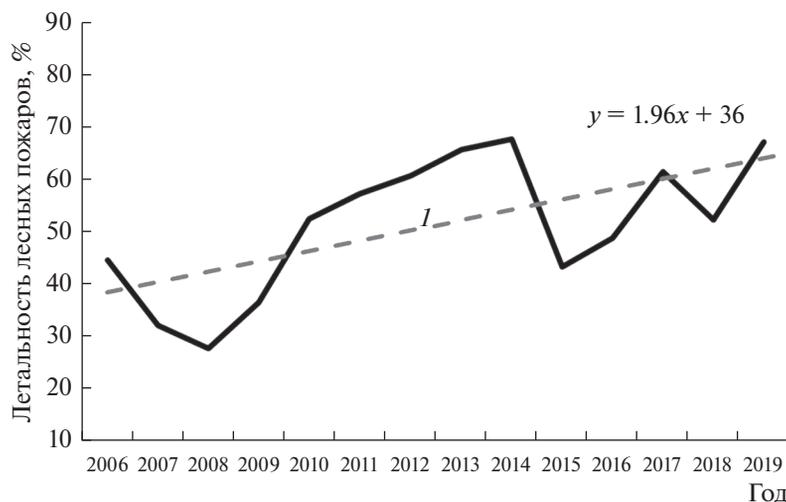


Рис. 1. Динамика летальности пожаров в лесах России в период 2006–2019 гг. 1 — тренд многолетних изменений показателя летальности.

Это, в свою очередь, открыло широкие возможности исследования пространственно-временных особенностей пирогенных повреждений лесов России, в том числе во взаимосвязи с их породной структурой и другими характеристиками (Барталев и др., 2015, 2017).

Проведенные исследования позволили, в частности, установить, что площадь ежегодно погибающих от пожаров лесов России характеризуется многократной изменчивостью (Барталев и др., 2015). При этом для среднесезонных функций распределения площади лесных пожаров в течение пожароопасного сезона характерно наличие выраженных пиков горимости в весенний и летний периоды года (Лурия и др., 2017). В то же время выявлено, что среднесезонная вероятность пирогенной гибели лесов характеризуется выраженным сезонным распределением с достижением максимума в летний период, в то время как весенним и осенним пожарам соответствуют многократно более низкие уровни повреждений (Барталев и др., 2015, 2017). Установление указанных закономерностей стимулирует дальнейшие исследования влияния сезонного распределения пройденной огнем площади лесов на степень их повреждения и гибели.

В качестве характеристики степени деструктивного воздействия пожаров на леса введем показатель их летальности, определяемый долей площади погибших лесов по отношению к их общей затронутой огнем площади. При этом площадь погибших от пожаров лесов определяется на основе спутниковых измерений показателя их средневзвешенной категории состояния (СКС), значения которого зависят от степени дефолиации и дехромации составляющих насаждения деревьев (Стыценко и др., 2013). В соответствии с

принятыми в лесном хозяйстве критериями (Руководство ..., 2007), на основе дистанционно измеренных значений показателя СКС выделяются следующие категории состояния лесов: здоровые и ослабленные (≤ 2.5), сильно ослабленные (2.5–3.5), усыхающее (3.5–4.5), погибшие (≥ 4.5). С учетом отсроченных во времени процессов постпожарных усыханий лесов при прогнозировании характеристик летальности пожаров на основе дистанционных измерений СКС, проведенных сразу после воздействия огня, целесообразно объединение категорий усыхающих и погибших лесов.

Анализ результатов, полученных с использованием разработанных ранее методов оценки пройденной огнем площади и степени пирогенного повреждения лесов на основе данных дистанционного зондирования спутниковой системой MODIS (Барталев и др., 2012, 2015; Стыценко и др., 2013), показывает, что в период 2006–2019 гг. динамика летальности пожаров в лесах России характеризуется диапазоном изменений от 27.5 до 67.5%, с достижением минимального и максимального значений в 2008 и 2014 гг. соответственно (рис. 1). При этом отмечается наличие положительного тренда летальности лесных пожаров со средним ежегодным приростом около 2%, а значение этого показателя в 2019 г. составило 66.9%, вплотную приблизившись к абсолютному его максимуму за охваченный спутниковыми наблюдениями период 2006–2019 гг.

Анализ результатов обработки многолетних данных спутниковых наблюдений выявил наличие выраженной зависимости летальности лесных пожаров от времени их возникновения и действия в течение сезона (рис. 2), позволяя рассматривать фактор сезонного распределения пройденной огнем площади в числе информативных предикторов пиро-

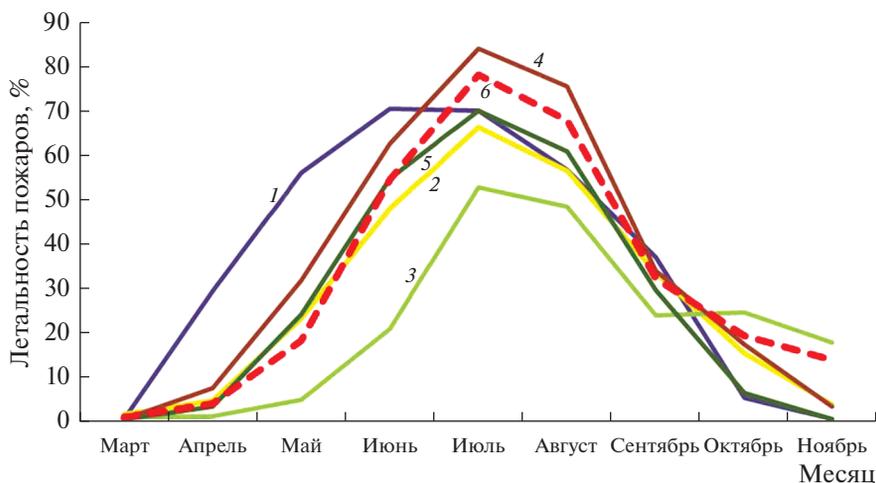


Рис. 2. Среднеголетнее сезонное распределение летальности пожаров в лесах России, в том числе для различных групп древесных пород. 1 – темнохвойный лес, 2 – светлохвойный лес, 3 – лиственный лес, 4 – хвойный листопадный лес, 5 – смешанный лес, 6 – все леса.

генной гибели лесов (Барталев и др., 2015). При этом, как уже отмечалось выше, летний период пожароопасного сезона характеризуется наиболее высокими значениями летальности лесных пожаров с достижением максимума показателя в июле. Одновременно следует отметить, что, отличаясь абсолютными значениями среднеголетней вероятности пирогенной гибели, леса с преобладанием различных древесных пород преимущественно демонстрируют сходную по общей направленности сезонную динамику летальности пожаров, включая близкое время достижения ее максимума (Барталев и др., 2017).

Наличие закономерностей сезонного распределения вероятности пирогенной гибели лесов дает возможность прогнозирования на этой основе уровня летальности пожаров в зависимости от времени их возникновения и действия (Барталев и др., 2017). Настоящая статья посвящена развитию подходов к оперативному прогнозированию и экспресс-оценке пирогенной гибели лесов на основе данных спутниковой оценки сезонного распределения площади пожаров.

МЕТОД ОЦЕНКИ ЛЕТАЛЬНОСТИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Созданная на основе результатов спутниковых наблюдений спектрорадиометром MODIS база геопространственных данных о пройденных огнем территориях и пирогенных повреждениях лесов (Барталев и др., 2012, 2015, 2017; Стыщенко и др., 2013) охватывает всю территорию России за период 2006–2019 гг. и ежегодно обновляется. Наличие продолжительного временного ряда данных создает основу для исследований закономерностей пирогенной гибели лесов и разработки но-

вых подходов к ее оценке на основе комплексирования данных дистанционных наблюдений со статистическими и эвристическими моделями.

В общем случае прямая оценка летальности лесных пожаров i -го года может быть получена на основе следующего очевидного выражения:

$$FL_i = MA_i \times BA_i^{-1}, \quad (1)$$

где FL_i – показатель летальности лесных пожаров; BA_i – площадь лесных пожаров; MA_i – площадь погибших от пожаров лесов.

Однако в силу того, что прямая дистанционная оценка площади пирогенной гибели лесов выполняется, как правило, со значительным (до нескольких месяцев) временным лагом (Барталев и др., 2017), для решения оперативных и прогнозных задач возможно использование оценок летальности, получаемых на основе следующего выражения:

$$FL_i = BA_i^{-1} \sum_j \sum_t (PF_j(t) \times BA_{ij}(t)), \quad (2)$$

где $BA_{ij}(t)$ – площадь пожаров i -го года, действовавших в лесах j -й группы пород в календарный день t ; $PF_j(t)$ – распределение вероятности гибели лесов от пожаров, действовавших в лесах j -й группы пород в календарный день t .

В отличие от метода оценки летальности пожаров на основе выражения (1), основанный на использовании формулы (2) подход может применяться в оперативном режиме, предполагая предварительное установление на основе исторических данных среднеголетнего сезонного распределения вероятностей пирогенной гибели лесов (Барталев и др., 2017). При этом, в силу зависимости вероятности пирогенной гибели лесов

от их породного состава, при использовании выражения (2) необходим учет этого фактора, как при анализе исторических данных, так и при оценке летальности пожаров в текущем пожароопасном сезоне. Необходимость учета породного состава лесов при определении летальности пожаров, в свою очередь, повышает требования к составу входных данных, а также может служить источником дополнительных погрешностей в значениях получаемых оценок.

Для снижения уровня зависимости оперативных оценок пирогенной гибели лесов от входных данных в настоящей работе предложен эвристический индекс сезонной летальности пожаров $SFLI_i$ (Seasonal Fire Lethality Index), вычисляемый следующим образом:

$$SFLI_i = BA_i^{-1} \sum_t |t - t^*| \times BA_i(t), \quad (3)$$

где $BA_i(t)$ – площадь лесных пожаров i -го года, действовавших в календарный день t ; t^* – кульминационный день летальности пожаров, соответствующий календарному дню, при котором достигается максимум критерия корреляции между значениями $SFLI_i$ и FL_i .

Из выражения (3) следует, что индекс $SFLI_i$ может интерпретироваться как взвешенное на площадь пожаров среднее отстояние времени их действия от кульминационного дня, а для его оперативной оценки требуется лишь информация о сезонном распределении площади лесных пожаров и предварительно установленное значение постоянной t^* .

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ сезонных распределений площади лесных пожаров на территории России (рис. 3) свидетельствует об их существенных межгодовых отличиях, выражающихся, в частности, в наличии в различные годы от одного до нескольких пиков горимости с разным временем их появления и относительно значительным вкладом в пройденную огнем площадь.

Появление наиболее раннего (апрель–май) и отчетливо выраженного весеннего пика горимости, как, например, в 2007 и 2009 гг., объясняется пожарами, часто возникающими в лесах в результате неконтролируемых палов сухой травы, осуществляемых преимущественно в сельскохозяйственных целях. Условия для проявления другого характерного пика горимости (июль–август, как, например, в 2006, 2010 и 2013 гг.), как правило, определяются сочетанием факторов летнего нарастания пожарной опасности в силу процессов высыхания природных горючих материалов при длительно сухой погоде, а также роста вероятности появления в лесах источников огня как следствие возрастающего присутствия людей и грозовой ак-

тивности (Соловьев и др., 2010; Подольская и др., 2011). Для ряда лет (например, 2007 и 2009 гг.) характерна множественность пиков сезонного распределения площади пожаров, часто сопровождаемая их слиянием (например, 2012, 2015 и 2016 гг.), что, вероятно, вызвано чрезвычайно высоким уровнем горимости лесов. Минимальные значения показателя летальности (2008 и 2014 гг.) приходится на годы с наиболее выраженным преобладанием весенних и летних пожаров в структуре пройденной огнем площади леса соответственно.

Анализ ежегодных сезонных распределений вероятности пирогенной гибели лесов (рис. 3) показывает, что положения их максимумов (DOY_{max}) варьируют в диапазоне от 181- до 215-го календарного дня года. При этом максимум среднесезонного распределения вероятности пирогенной гибели лесов России приходится на 203-й календарный день года.

Метод оценки значения кульминационного дня летальности лесных пожаров основан на поиске максимума критерия корреляции между величинами индекса $SFLI_i$ и показателя FL_i при задании различных значений t^* . Рисунок 4 отражает зависимость коэффициента детерминации R^2 между величинами $SFLI_i$ и FL_i , рассчитанными по данным о пожарах в лесах России в период 2006–2019 гг. от выбора значения кульминационного дня t^* .

При значении кульминационного дня $t^* = 200$ (соответствует календарному дню 19 июля) достигается максимум указанной функции со значением коэффициента детерминации $R^2 = 0.80$, свидетельствующим о достаточно хорошем приближении линейной зависимости связи между различными показателями летальности лесных пожаров, что наглядно иллюстрируется рис. 5.

Быстрый рост значений коэффициента детерминации до достижения им максимума и относительно медленный последующий спад объясняются более весомым вкладом весенних и летних пожаров в ежегодно повреждаемую огнем площадь лесов России, а, следовательно, и их наибольшим влиянием на интегральный уровень летальности пожаров и значения индекса $SFLI_i$. Медленный спад значений коэффициента детерминации после прохождения его функцией максимума отражает существенно меньший вклад в общую пройденную огнем площадь и гибель лесов осенних пожаров при их большей (по сравнению с весенним пиком горимости) близости по времени к дате кульминации летальности лесных пожаров, что согласуется с приведенными на рис. 3 сезонными распределениями.

Выбор 19 июля в качестве значения t^* приводит к следующей линейной зависимости между

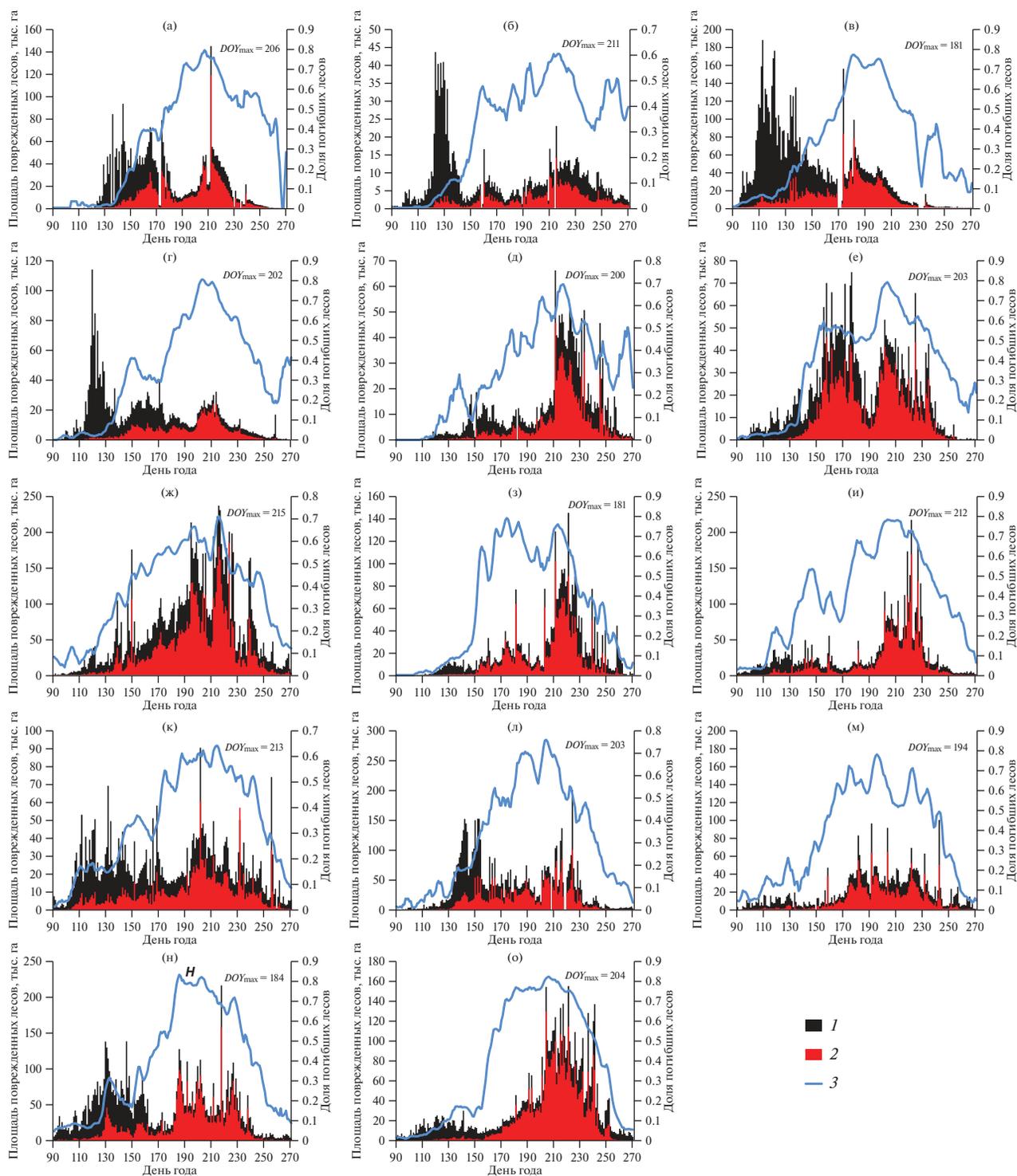


Рис. 3. Сезонные распределения площади поврежденных пожарами и погибших лесов на территории России в 2006–2019 гг. а – 2006 г., б – 2007 г., в – 2008 г., г – 2009 г., д – 2010 г., е – 2011 г., ж – 2012 г., з – 2013 г., и – 2014 г., к – 2015 г., л – 2016 г., м – 2017 г., н – 2018 г., о – 2019 г.; 1 – пройденные огнем площади, 2 – погибшие леса; 3 – доля погибших лесов; DOY_{max} – сезонный максимум вероятности пирогенной гибели лесов.

показателем летальности лесных пожаров и индексом $SFLI_i$:

$$FL_i = 0.99 - 0.0129 \times SFLI_i \quad (R^2 = 0.80), \quad (4)$$

из которой следует, что теоретически при нулевом значении индекса $SFLI_i$, т.е. при гипотетическом действии всех пожаров в день кульминации, их совокупная летальность составит 99% или,

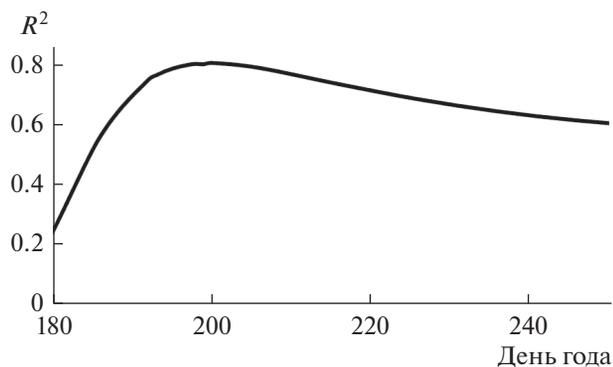


Рис. 4. Коэффициент детерминации R^2 между значениями летальности лесных пожаров, вычисленными на основе выражения (1) и индекса $SFLI_i$ (выражение (3)) при выборе различных значений кульминационного дня t^* .

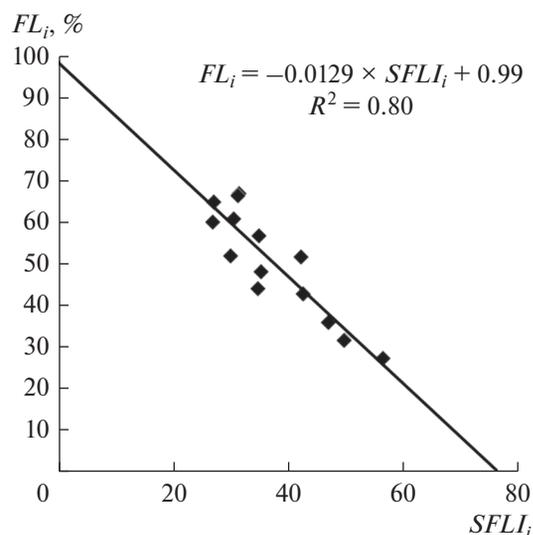


Рис. 5. Аппроксимация линейной зависимостью взаимосвязи значений показателей летальности лесных пожаров $SFLI_i$ и FL_i .

иными словами, с высокой вероятностью приведет к практически полной гибели лесов. При этом по мере роста индекса $SFLI_i$ величина показателя летальности лесных пожаров снижается, достигая нуля при значении $SFLI_i = 77$ дней. Таким образом, исходя из этих оценок, можно предположить, что гибель лесов России от пожаров, действующих за пределами временного интервала от 4 мая до 4 октября, является крайне маловероятной. При этом для указанного набора данных среднеквадратическая погрешность определения доли погибших лесов на основе индекса $SFLI_i$ составила $\pm 10.5\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов обработки многолетних данных спутниковых наблюдений демонстрирует наличие зависимости вероятности пирогенной гибели лесов от времени возникновения и действия огня в течение сезона, позволяя рассматривать фактор сезонного распределения площади пожаров в числе информативных предикторов их летальности. Предложенный в настоящей статье новый индекс сезонной летальности лесных пожаров позволяет оценивать масштабы пирогенной гибели лесов России на основе информации о сезонном распределении пройденной огнем площади, получаемой по результатам спутникового мониторинга.

Приведенные результаты обработки данных спутникового мониторинга пройденной огнем площади и пирогенной гибели лесов России за период 2006–2019 гг. демонстрируют наличие линейной взаимосвязи значений предложенного индекса с показателем летальности лесных пожаров, достигающей максимума коэффициента детерминации ($R^2 = 0.80$) при значении кульминационного календарного дня летальности 19 июля. Получаемое при этом линейное уравнение регрессионной взаимосвязи между двумя показателями обеспечивает возможность дистанционной оценки летальности лесных пожаров со среднеквадратической погрешностью $\pm 10.5\%$. Одновременно указанная взаимосвязь наглядно демонстрирует практически полную (99% пройденной огнем площади) гибель лесов от пожаров, возникающих и действующих в установленный нами календарный день кульминации их летальности. Анализ полученных результатов также свидетельствует о близкой к нулю вероятности гибели лесов России от пожаров, возникающих и действующих за пределами временного интервала “май–октябрь”.

Для спутниковой оценки летальности лесных пожаров на основе предложенного метода характерны минимальные требования к входным данным, включающим в себя лишь информацию о распределении пройденной огнем площади лесов в течение пожароопасного сезона, при возможности оперативного его применения в масштабах страны. Полученные результаты могут иметь непосредственное практическое значение для оптимизации режимов охраны лесов России от пожаров с учетом их потенциальной летальности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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.
- Барталев С.А., Стыценко Ф.В., Хвостиков С.А., Лупян Е.А. Методология мониторинга и прогнозирования пирогенной гибели лесов на основе данных спутниковых

наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 176–193.

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-ТМ/ЕТМ+ // Там же. 2012. Т. 9. № 2. С. 9–27.

Лупян Е.А., Барталев С.А., Балашов И.В., Егоров В.А., Ершов Д.В., Кобец Д.А., Сенько К.С., Стыценко Ф.В., Сычугов И.Г. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в 21 веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активно-горения) // Там же. 2017. Т. 14. № 6. С. 158–175.

Подольская А.С., Ершов Д.В., Шуляк П.П. Применение метода оценки вероятности возникновения лесных пожаров в ИСДМ-Рослесхоз // Там же. 2011. Т. 8. № 1. С. 118–126.

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.

Руководство по проектированию, организации и ведению лесопатологического мониторинга. Утверждено приказом Рослесхоза от 29.12.2007 № 523 // Правовая система Консультант плюс, URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_129394 (дата обращения: 15.08.2020)

Соловьев В.С., Козлов В.И., Каримов Р.Р., Васильев М.С. Комплексный мониторинг грозовой активности и лесных пожаров по данным наземных и спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 4. С. 218–222.

Стыценко Ф.В., Барталев С.А., Егоров В.А., Лупян Е.А. Метод оценки степени повреждения лесов пожарами на основе спутниковых данных MODIS // Там же. 2013. Т. 10. № 1. С. 254–266.

Харук В.И., Пономарев Е.И. Пожары и гари сибирской тайги // Наука из первых рук. 2020. № 2(87). С. 56–71.

Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г. Климатические изменения и лесные пожары в России // Лесоведение. 2013. № 5. С. 50–61.

An Assessment of the Forest Stands Destruction by Fires Based on the Remote Sensing Data on a Seasonal Distribution of Burnt Areas

S. A. Bartalev^{1,2,*} and F. V. Stytsenko^{1,2}

¹Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Profsoyuznaya st., 84/32, bldg. 14, Moscow, 117997 Russia

²Center for Forest Ecology and Productivity of the RAS, Profsoyuznaya st., 84/32, bldg. 14, Moscow, 117997 Russia

*E-mail: bartalev@d902.iki.rssi.ru

The paper presents the results of the lethality assessment of forest fires (the proportion of the dead forests area in comparison to their total area affected by fire) in the Russian forests for the period of 2006–2019. according to remote sensing data. The determined dependence of the probability of forests' pyrogenic destruction on the time of the fire starting and its overall impact during the season allow us to consider the factor of the seasonal distribution of the area of fires one of the informative predictors of their lethality. The SFLI (Seasonal Fire Lethality Index) suggested in the article makes it possible to estimate the scale of Russian forests' pyrogenic destruction based on the information obtained from satellite monitoring of the area covered by fire distribution during a fire hazardous season. The results obtained demonstrate the presence of a linear correlation between the value of the proposed index and the values of the forest fires lethality index. At the same time, the determination coefficient of the correlation between the two above-mentioned characteristics reaches its maximum ($R^2 = 0.80$) on July 19, which determines the choice of this calendar date as the culminating day of the forest fires' lethality. The linear regression equation corresponding to this calendar date between the characteristics of the fires' lethality for the forests of Russia provides the possibility of its annual remote assessment with a mean square error of $\pm 10.5\%$. To assess the lethality of forest fires on the basis of the proposed method, there are minimal requirements for input data, which include only information on the distribution of the forest area covered by fire during the fire-hazardous season, which makes it possible to use it promptly on a national scale. The results obtained can be of direct practical importance for optimizing the fire protection regimes of Russian forests, taking into account the fires' potential lethality.

Keyword: forest fires, pyrogenic destruction of forests, forest fires monitoring, remote sensing, Seasonal Fire Lethality Index.

Acknowledgements: The work has been carried out with a financial support of the RSCF (19-77-30015). Infrastructure of the Shared Knowledge Centre "IKI-Monitoring", developed and being maintained within the framework of the "Monitoring" programme (state register code 01.20.0.2.00164) was used to carry out this research. Statistical processing of data was carried out within the framework of the State Contract with CEPF RAS AAAA-A18-118052590019-7.

REFERENCES

- Bartalev S.A., Egorov V.A., Efremov V.Y., Lupyan E.A., Stytsenko F.V., Flitman E.V., Otsenka ploshchadi pozharov na osnove kompleksirovaniya sputnikovyykh dannyykh razlichnogo prostranstvennogo razresheniya MODIS i Landsat-TM/ETM+ (Integrated burnt area assessment based on combine use of multi-resolution MODIS and Landsat-TM/ETM+ satellite data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 9–27.
- Bartalev S.A., Stytsenko F.V., Egorov V.A., Loupian E.A., Sputnikovaya otsenka gibeli lesov Rossii ot pozharov (Satellite-based assessment of Russian forest fire mortality), *Lesovedenie.*, 2015, No. 2, pp. 83–94.
- Bartalev S.A., Stytsenko F.V., Khvostikov S.A., Loupian E.A., Metodologiya monitoringa i prognozirovaniya pirogennoi gibeli lesov na osnove dannyykh sputnikovyykh nablyudenii (Methodology of post-fire tree mortality monitoring and prediction using remote sensing data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 176–193.
- http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_129394 (August 15, 2020)
- Kharuk V.I., Ponomarev E.I., Pozhary i gari sibirskoi taigi (Fires and burns of the Siberian taiga), *Nauka iz pervyykh ruk*, 2020, No. 2(87), pp. 56–71.
- Lupyan E.A., Bartalev S.A., Balashov I.V., Egorov V.A., Ershov D.V., Kobets D.A., Sen'ko K.S., Stytsenko F.V., Sychugov I.G., Sputnikovyi monitoring lesnykh pozharov v 21 veke na territorii Rossiiskoi Federatsii (tsifry i fakty po dannym detektirovaniya aktivnogo goreniya) (Satellite monitoring of forest fires in the 21st century in the territory of the Russian Federation (facts and figures based on active fires detection)), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 158–175.
- Podol'skaya A.S., Ershov D.V., Shulyak P.P., Primenenie metoda otsenki veroyatnosti vozniknoveniya lesnykh pozharov v ISDM-Rosleskhoz (Forest fire occurrence probability assessment: method and approach in Russian remote monitoring information system (ISDM-Rosleskhoz)), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 1, pp. 118–126.
- 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.
- Shvidenko A.Z., Shchepashchenko D.G., Climate change and wildfires in Russia, *Contemporary Problems of Ecology*, 2013, Vol. 6, No. 7, pp. 683–692.
- Solov'ev V.S., Kozlov V.I., Karimov R.R., Vasil'ev M.S., Kompleksnyi monitoring grozovoi aktivnosti i lesnykh pozharov po dannym nazemnykh i sputnikovyykh nablyudenii (Simultaneous monitoring of thunderstorm activity and forest fires on data of ground-base and remote sensing observations), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, Vol. 7, No. 4, pp. 218–222.
- Stytsenko F.V., Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A., Metod otsenki stepeni povrezhdeniya lesov pozhamami na osnove sputnikovyykh dannyykh MODIS (Post-fire forest tree mortality assessment method using MODIS satellite data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 1, pp. 254–266.