

## Метод оценки степени повреждения лесов пожарами на основе спутниковых данных MODIS

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

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

E-mail: smis@smis.iki.rssi.ru

В работе представлен новый метод оценки степени повреждения лесов пожарами с использованием многолетних рядов данных спутниковых наблюдений, получаемых спектрорадиометром MODIS. Степень повреждения лесов, выражаемая средневзвешенной категорией состояния (СКС) древостоев, оценивается на основе ранее установленной взаимосвязи между значением указанной характеристики и величиной нормализованной разности коротковолнового вегетационного индекса RdSWVI. В качестве оценки степени повреждения лесов принимается значение СКС в момент времени, соответствующий максимуму RdSWVI, достигнутому после пожара, до конца текущего календарного года. При этом оценка СКС проводится только для пожаров, демонстрирующих устойчивые изменения сезонной динамики коротковолнового вегетационного индекса в сравнении с его многолетней статистической нормой в предшествующий пожару пятилетний период. Использование разработанного метода позволило оценить степень повреждения лесов России пожарами за период 2006–2012 гг.

**Ключевые слова:** лесные пожары, повреждения лесов, дистанционное зондирование, методы обработки спутниковых данных.

### Введение

Леса России регулярно подвергаются воздействию пожаров на огромной площади, измеряемой миллионами гектар. Вызываемые пожарами последствия для древостоев могут варьировать от незначительных краткосрочных повреждений до полной их гибели, в зависимости от типа пожара (подземный, низовой, верховой), его интенсивности и продолжительности, породной структуры лесов, их состояния, стадии фенологического развития и многих других факторов, характеризующих процессы горения и устойчивость насаждений к пирогенному воздействию.

Объективная и своевременная информация о последствиях пожаров необходима для решения широкого класса прикладных задач лесного хозяйства, включая планирование охраны и защиты лесов, лесопользование и лесовосстановление, актуализацию данных о лесных ресурсах. Данные о степени повреждения лесов пожарами являются неотъемлемой составляющей информационного обеспечения оценок объемов прямых и вторичных пирогенных эмиссий углекислого и других тепличных газов в атмосферу, выполняемых в рамках обязательств стран по условиям Киотского протокола, а также научных исследований по проблемам глобальных изменений климата и биосфера. Безусловно, широкая сфера текущего и потенциального использования объективной информации о повреждениях лесов пожарами в практической деятельности и научных исследованиях далеко не ограничивается приведенными выше примерами.

Традиционно оценка последствий лесных пожаров выполняется выборочно методами наземного лесопатологического обследования на основе визуальной оценки дефолиации или дехромации крон репрезентативной совокупности отдельных деревьев на пробных

площадках с последующим определением интегральных характеристик состояния поврежденных насаждений. Очевидно, что использование такого рода методов сопряжено с существенными финансовыми и трудовыми затратами, а их регулярное применение в масштабах страны едва ли экономически оправданно и практически реализуемо. В последние годы в отечественной практике организации и проведения лесопатологических обследований все большее применение находят спутниковые изображения, позволяющие существенно повысить полноту выявления и точность определения площади усыхающих насаждений, а также более эффективно организовать наземную оценку количественных характеристик их состояния (Крылов и Владимира, 2011).

Возможность использования спутниковых данных для оценки степени повреждения лесов пожарами отмечалась многими исследователями (Isaev et al., 2002; García-Haro et al., 2001; Diaz-Delgado et al., 2003; Doerr et al., 2006; Барталев и др., 2010). Результаты исследований, в частности, продемонстрировали наличие корреляции между показателями степени повреждения и значениями коэффициента отражения в среднем инфракрасном канале (White et al., 1996), нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI (Hammill and Bradstock, 2006; Chafer et al., 2004) и ряда других вегетационных индексов (Key, Benson, 2002), получаемых на основе спутниковых изображений. Была отмечена также целесообразность комбинированного использования разновременных спутниковых данных, полученных до и после пожара (Cocke et al., 2005; Epting et al., 2005). При этом большинство исследований до настоящего времени носило локальный характер, выполняясь на небольших территориях, часто ограниченных отдельными пожарами.

Разработанные к настоящему времени автоматические технологии спутникового мониторинга обеспечивают фактически непрерывное выявление и оценку площади повреждений лесов России пожарами на основе комплексного использования данных MODIS и Landsat-TM/ETM+ (Барталев и др., 2012). Выполненные эксперименты (Барталев и др., 2010) позволили определить информативность различных разновременных спектральных вегетационных индексов для оценки степени повреждения лесов пожарами по данным измерений отраженного излучения в видимом, ближнем и среднем ИК диапазонах спектра. Будучи логическим продолжением вышеупомянутых исследований и разработок в области дистанционного мониторинга последствий лесных пожаров, описанный в настоящей работе метод открывает новые возможности оперативного и регулярного сбора в масштабах страны информации о состоянии поврежденных лесов в количественных показателях, принятых отечественной практикой лесного хозяйства.

## Описание метода

### *Используемые данные и общая логическая схема метода*

Разработанный метод дистанционной оценки степени повреждения лесов пожарами основан на использовании данных спектрорадиометра MODIS со спутника Терра, обеспечивающего ежедневные глобальные измерения отражательной способности земной поверхности.

Созданный в ИКИ РАН архив данных MODIS на территорию Северной Евразии охватывает период с 2000 г. и непрерывно пополняется. В основу разработанного метода положено использование данных стандартного продукта MOD09, включающего, в частности, измерения отражательной способности в ближнем (858 нм) и среднем (1640 нм) ИК каналах. Методом также предусмотрено использование, полученных на основе данных MODIS, информационных продуктов, отражающих результаты картографирования растительного покрова России (Барталев и др., 2011) и пройденных огнем площадей (Барталев и др., 2012). Основанный на анализе ежедневных данных о динамике отражательной способности земной поверхности, алгоритм выявления пройденных огнем площадей позволяет также определять и дату пожара. Ежегодно обновляемая карта растительного покрова отражает покрытую лесом территорию с выделением семи различных классов лесных экосистем.

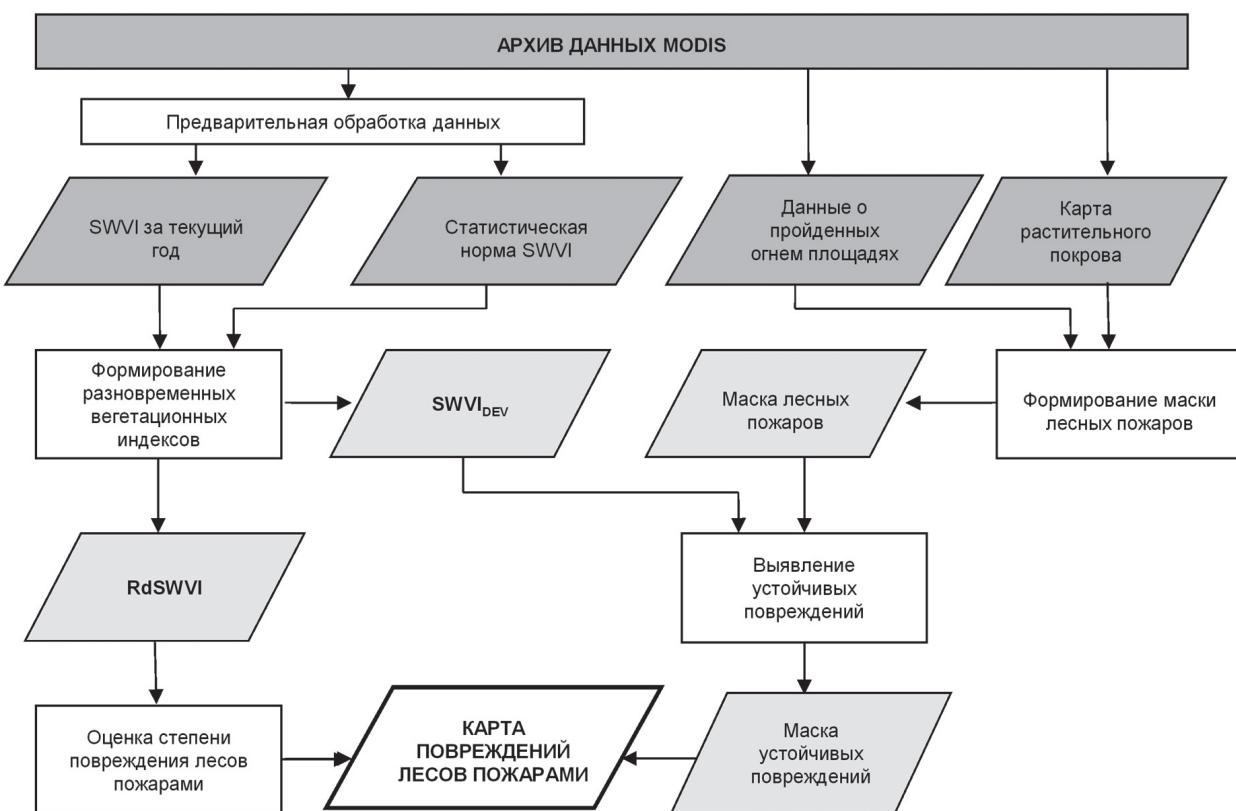


Рис. 1. Логическая схема метода оценки степени повреждения лесов пожарами

Метод оценки степени повреждения лесов пожарами включает последовательное выполнение следующих шагов (рис. 1):

- формирование маски лесных пожаров на основе данных о растительном покрове и пройденных огнем площадях;
- предварительная обработка данных MODIS для исключения из дальнейшей обработки пикселов, значения которых искажены под влиянием облаков или аппаратных сбоев;
- построение многолетних рядов коротковолнового вегетационного индекса  $SWVI$  с использованием свободных от шумов пикселов и восстановлением пропущенных значений;

- построение статистической нормы сезонной динамики значений  $SWVI$  на основе исторических данных спутниковых наблюдений;
- построение временных рядов индексов  $SWVI_{DEV}$  и  $RdSWVI$ ;
- выявление лесных пожаров с неустойчивым проявлением повреждений на основе временных рядов  $SWVI_{DEV}$ ;
- оценка степени повреждения лесов на основе временных рядов  $RdSWVI$ ;
- разделение пройденных пожарами лесов по различным категориям повреждения.

Предварительная обработка данных MODIS включает в себя детектирование облаков и их теней, а также снежного покрова (Барталев и др., 2012) с последующим формированием временных рядов ежедневных значений коротковолнового вегетационного индекса  $SWVI$  (Ceccato et al., 2001; Gao, 1996) на основе формулы:

$$SWVI = \frac{R_{nir} - R_{swir}}{R_{nir} + R_{swir}}, \quad (1)$$

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

Следующий этап предварительной обработки данных обеспечивает заполнение пропущенных значений, фильтрацию выбросов и сглаживание временных рядов  $SWVI$  (Лупян и др., 2011).

#### *Нормализованная разновременная разность коротковолнового вегетационного индекса как характеристика состояния поврежденных пожарами лесов*

В качестве характеристики повреждений лесов часто используется средневзвешенная категория состояния (СКС), рассчитываемая следующим образом (Руководство по проведению, 2007):

$$CKC = \frac{\sum_{i=1}^4 iK_i + 5 \sum_{i=5}^6 K_i}{\sum_{i=1}^6 K_i}, \quad (2)$$

где  $K_i$  – число деревьев  $i$ -ой категории состояния деревьев согласно лесопатологической классификации, включающей оценку степени дефолиации и дехромации крон. Традиционно устанавливаются следующие верхние границы интервалов значений СКС для отнесения насаждения к категориям состояния: 1,5 – здоровое насаждение; 2,5 – ослабленное; 3,5 – сильно ослабленное; 4,5 – усыхающее. Насаждения со средневзвешенной категорией состояния выше 4,5 относятся к погибшим.

Вызванное воздействием огня снижение содержание хлорофилла и влажности древесных растений приводит к снижению их отражательной способности в видимой и ближней ИК областях спектра, а также к ее увеличению в средней ИК области (White et al., 1996). Проведенные ранее исследования (Барталев и др., 2010) показали, что величина СКС лесов

может оцениваться дистанционно на основе ее близкой к линейной связи с нормализованной разновременной разностью коротковолнового вегетационного индекса  $RdSWVI$  (Miller, Thode, 2007), определяемой по спутниковым данным следующим образом:

$$RdSWVI = \frac{SWVI_{pre} - SWVI_{post}}{\sqrt{SWVI_{pre} + 1}}, \quad (3)$$

где  $SWVI_{pre}$  – значение индекса, полученное по изображению на заданную дату в год, предшествующий пожару, а  $SWVI_{post}$  – значение индекса после воздействия огня. При этом значения СКС лесов оцениваются на основе значений  $RdSWVI$  с использованием уравнения вида:

$$CKC = a * RdSWVI + b, \quad (4)$$

где коэффициенты  $a$  и  $b$  определяются экспериментально на основе совместного анализа данных спутниковых наблюдений и наземных лесопатологических обследований.

Вместе с тем в случаях, когда величина  $RdSWVI$  отражает не реальное состояние лесов, а определяется вызванными пожарами повреждениями напочвенного растительного покрова, выражение (4) оказывается неприменимым для дистанционной оценки СКС. При этом следует отметить, что особенно часто такого рода повреждения вызываются весенними пожарами и носят краткосрочный характер ввиду быстрого восстановления напочвенного растительного покрова. В этой связи возникает задача выявления пожаров с наличием устойчивых во времени изменений спектрально-отражательных характеристик, вызванных с более высокой вероятностью повреждениями лесов, как достаточно инерционного типа наземных экосистем.

### *Классификация поврежденных пожарами лесов по устойчивости изменений сезонной динамики их отражательных характеристик*

Выделение поврежденных пожарами лесов с наличием устойчивых изменений сезонной динамики их отражательных характеристик выполняется на основе сравнения многолетней статистической нормы временных рядов  $SWVI$  и значений индекса в период с момента выявления пожара до окончания значимых (т.е. свободных от влияния снега и облаков) спутниковых наблюдений в текущем году.

Статистическая норма временных рядов  $SWVI$  задается среднемноголетними значениями  $M_{swvi}^N(\Theta^*, t)$  и стандартным отклонением  $\sigma_{swvi}^N(\Theta^*, t)$  индекса для каждого пикселя с координатами  $\Theta^*$  в день года  $t$  следующим образом:

$$M_{swvi}^N(\Theta^*, t) = \frac{1}{N} \sum_{y=1}^Y \sum_{t-\Delta t}^{t+\Delta t} SWVI(\Theta^*, t, y) \quad (5)$$

$$\sigma_{swvi}^N(\Theta^*, t) = \left( \sum_{y=1}^Y \sum_{t-\Delta t}^{t+\Delta t} (SWVI(\Theta^*, t, y) - M_{swvi}^N(\Theta^*, t))^2 \right)^{1/2} \quad (6)$$

$$\forall t(t = \overline{1, 365}) \text{ и } \forall y(y = \overline{1, Y}),$$

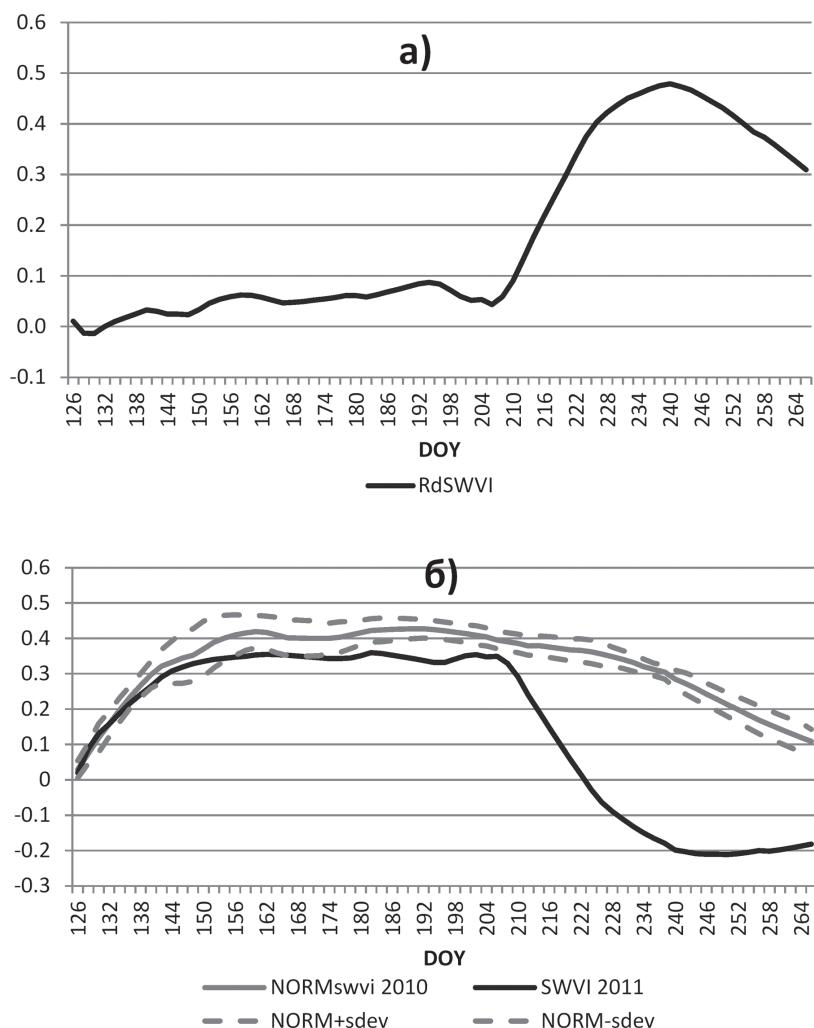
где  $y$  – индекс года внутри опорного периода продолжительностью  $Y = 5$ ;  $\Delta t = 3$  – ширина времененного скользящего окна для статистической оценки внутригодовой динамики индекса  $SWVI$ ;  $N = Y(2\Delta t + 1)$  – общее количество измерений, использующихся при оценке индекса  $SWVI$  для заданного пикселя  $\Theta^*$  в день  $t$ .

Индекс  $RdSWVI$  рассчитывался на основе многолетних временных серий  $SWVI$  следующим образом:

$$RdSWVI = \frac{M_{swvi}^N(\Theta^*, t) - SWVI^C(\Theta^*, t)}{\sqrt{M_{swvi}^N(\Theta^*, t) + 1}}, \quad (7)$$

где  $SWVI^C$  – значение пикселя в текущем году.

На рис. 2 представлен пример среднемноголетней нормы индекса  $SWVI$  и его значений в текущем году для поврежденного пожаром леса, а также полученного на их основе индекса  $RdSWVI$ . В поведении  $RdSWVI$  после пожара наблюдается быстрый рост с достижением максимума и некоторым последующим снижением значений, что объясняется фенологически обусловленным падением среднемноголетней нормы  $SWVI$ .

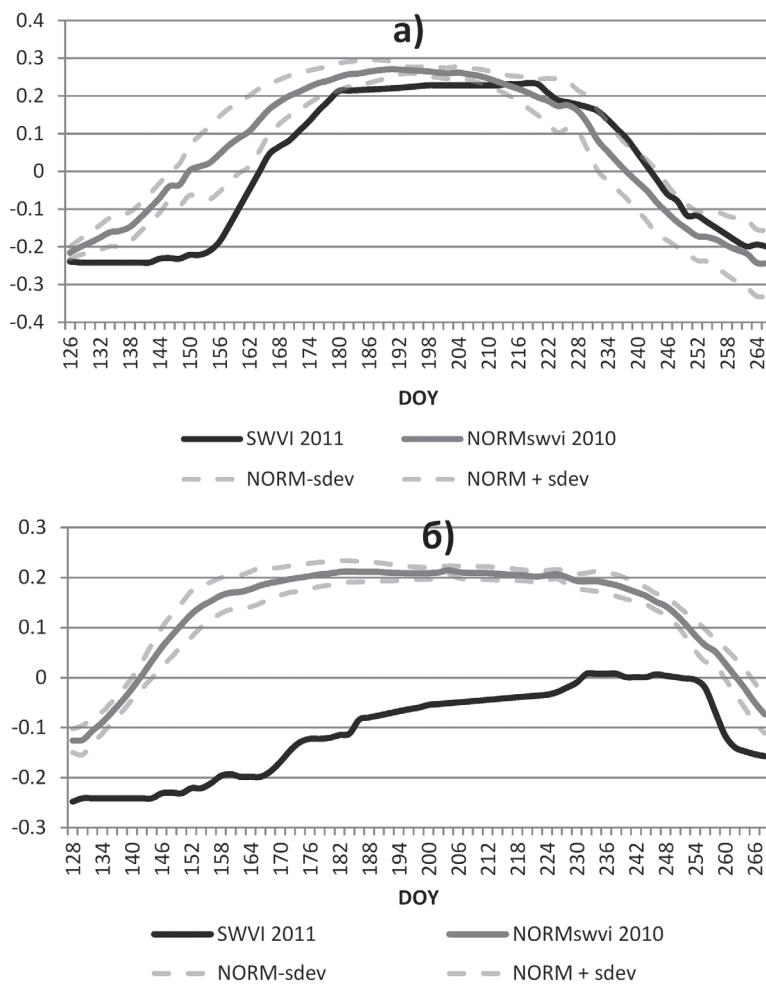


*Рис. 2. Пример динамики индексов  $SWVI$  и  $RdSWVI$  поврежденного пожаром леса: а) динамика  $RdSWVI$  в текущем году; б) сезонная динамика среднемноголетней нормы  $SWVI$  и значений индекса в текущем году*

Метод подразумевает нахождение максимума индекса  $RdSWVI$  за вегетационный сезон после даты обнаружения пожара с последующим пересчетом в значения СКС на основе выражения (4). Предполагается, что степень повреждения древостоев может возрастать после пожара в связи с усыханием, но не может уменьшаться в текущем году. Однако, как указывалось ранее, весенние пожары, оказывая слабое деструктивное воздействие на древостои, могут вызывать повреждения напочвенного растительного покрова, ошибочно интерпретируемые как повреждения лесов (пример на *рис. 3a*). Для выделения поврежденных пожарами лесов с наличием устойчивых изменений разработанный метод предусматривает получение интегрированной по времени характеристики изменений спектрально-отражательных свойств поврежденных лесов, а именно:

$$SWVI_{DEV} = (\Delta n)^{-1} \sum_n^{\Delta n} \frac{M_{swvi}^N(\Theta^*, t) - SWVI^C(\Theta^*, t)}{\sigma_{swvi}^N(\Theta^*, t)}, \quad (8)$$

где  $\Delta n$  – количество дней с доступными измерениями после дня пожара  $n$ ,  $\sigma_{swvi}^N(\Theta^*, t)$  – стандартное отклонение  $SWVI$  для пикселя с координатами  $\Theta^*$  в день года  $t$ . Данная характеристика отражает интегральную величину падения индекса  $SWVI$ , вызванную воздействием огня и выраженную в количестве стандартных отклонений.



*Рис. 3. Примеры динамики значений  $SWVI$  поврежденных пожарами лесов с: (а) неустойчивыми и (б) устойчивыми изменениями спектрально-отражательных характеристик*

Таким образом, оценка СКС лесов выполняется на основе уравнения (4) для пожаров с устойчивыми повреждениями, выделяемыми на основе критерия  $SWVI_{DEV} > P$ , где  $P$  – экспериментально установленное пороговое значение. Результаты работы метода представляются в виде карты повреждений лесов пожарами с выделением следующих четырех категорий:

- слабо поврежденные/ослабленные (леса с неустойчивыми повреждениями, а также леса с СКС $\leq 2,5$ );
- сильно ослабленные леса ( $2,5 < \text{СКС} \leq 3,5$ );
- усыхающие леса ( $3,5 < \text{СКС} \leq 4,5$ );
- погибшие леса ( $\text{СКС} > 4,5$ ).

### **Экспериментальная оценка параметров**

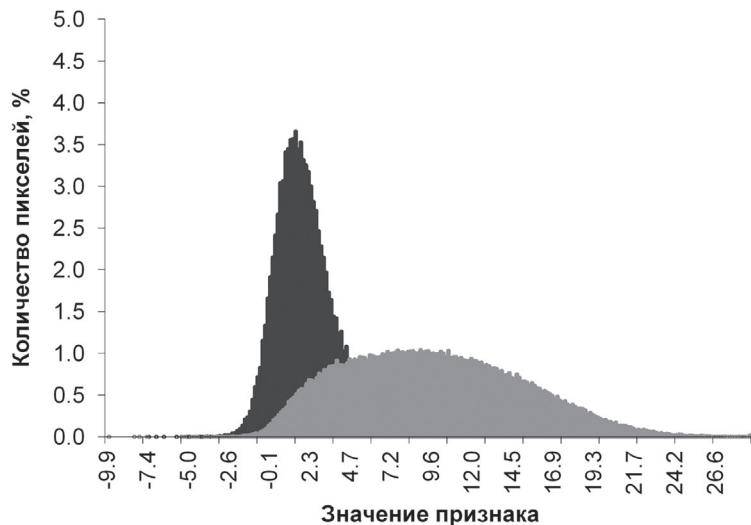
Экспериментальное определение коэффициентов регрессионного уравнения (4) выполнено по результатам исследований на территории Центральной Сибири, включавших полевые обследования поврежденных пожарами лесов с преобладанием сосны, березы и лиственницы (Барталев и др., 2010). Обследование производилось на 8 гарях с закладкой. Заложено 378 пробных площадей, 221 из которых – на участках с полной гибелью деревьев. В качестве спутниковых данных использовались разновременные спутниковые изображения Landsat-TM/ETM+, преобразованные в значения коэффициентов спектральной яркости (Landsat7 Science Data Users Handbook, 2003) и взаимно радиометрически нормализованные (Schroeder et al., 2006). Полученные значения коэффициентов спектральной яркости были использованы для расчета значений индекса RdSWVI и последующего анализа их взаимосвязи с СКС лесов, определенной в ходе наземных обследований. Коэффициент детерминации, полученного в результате регрессионного уравнения СКС =  $8,33 * \text{RdSWVI} + 1,69$  составил 0,78. Стоит отметить, что, будучи репрезентативным для ряда древесных пород в лесах Центральной Сибири, полученные на настоящем этапе коэффициенты регрессионного уравнения требуют верификации в других регионах России. Одним из направлений развития метода также может являться настройка коэффициентов регрессионной модели на различные типы леса.

Определение порога  $P$  для выделения пожаров с устойчивыми повреждениями лесов на основе индекса  $SWVI_{DEV}$  выполнено на основе опорной выборки, сформированной для лесных пожаров 2010 г. на территории России. Формирование выборки осуществлялось на основе значений  $SWVI$  по состоянию на 15 июля 2011 г., а также многолетних данных  $SWVI$  в данный день в период 2005–2009 гг. При этом для выделения пожаров с устойчивыми повреждениями лесов использовалось следующее условие:

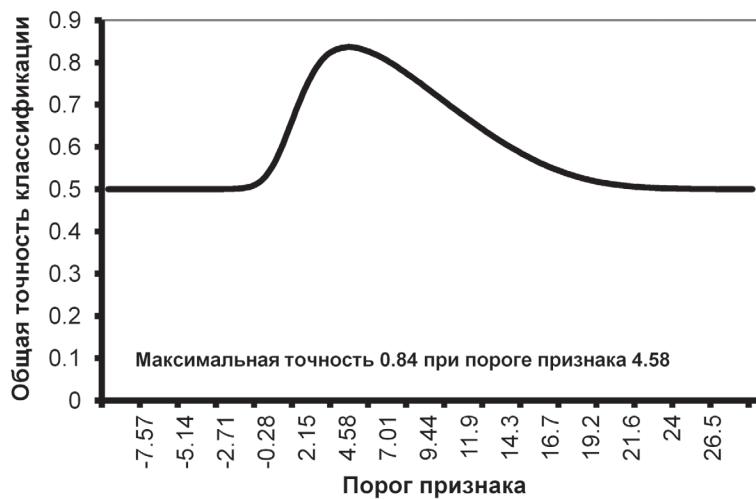
$$\frac{M_{swvi}^N(\Theta^*, t) - SWVI^C(\Theta^*, t)_{2011}}{\sigma_{swvi}^N(\Theta^*, t)} > 3, \quad (9)$$

где  $t = 195$  – номер дня в году.

Критерий (9) характеризует величину отклонения SWVI в последующий за пожаром год от среднемноголетней нормы в величинах стандартного отклонения и позволяет отделять пожары со значимыми изменениями в отражательной способности. Полученные опорные данные позволили определить пороговое значение индекса  $SWVI_{DEV}$ , рассчитываемого непосредственно в год пожара. На *рис. 4* показаны гистограммы распределения  $SWVI_{DEV}$  для классов устойчивых и неустойчивых повреждений лесов, позволившие установить разделяющий их порог  $P = 4,58$  на основе критерия минимума суммы ошибок классификации первого и второго рода (*рис. 5*).



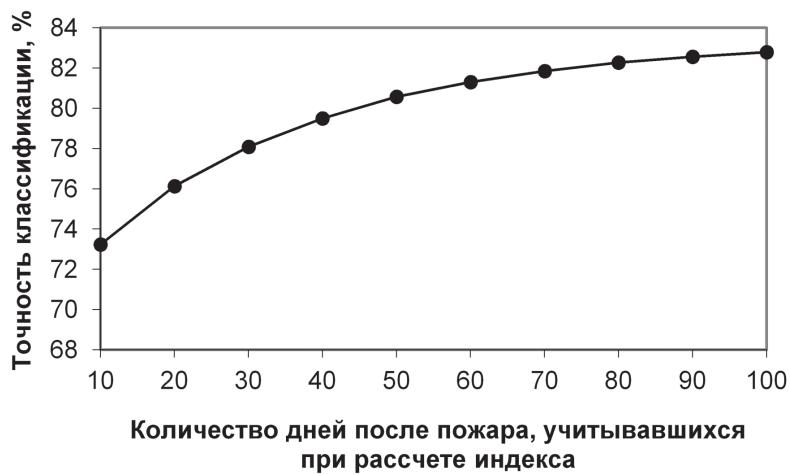
*Рис. 4. Распределение индекса  $SWVI_{DEV}$  для классов устойчивых и неустойчивых повреждений лесов (показаны черным и серым соответственно)*



*Рис. 5. Общая точность классификации устойчивых и неустойчивых повреждений лесов пожарами при использовании различных порогов разделения классов*

Полученный порог используется при выделении лесов с устойчивыми повреждениями. Для определения минимального количества измерений, необходимых для представительной оценки  $SWVI_{DEV}$  и последующей классификации лесов по устойчивости

повреждений, проведен расчет значений индекса при различном числе измерений после пожара. При этом разделение устойчивых и неустойчивых повреждений проводилось с применением полученного ранее порога Р и оценкой точности классификации на основе опорной выборки (*рис. 6*). Полученная зависимость позволяет определить вероятность правильной классификации в зависимости от количества спутниковых измерений, использованных для получения индекса  $SWVI_{DEV}$ . При этом пиксели для которых на момент оценки было доступно менее десяти спутниковых наблюдений, после пожара относились к категории не обеспеченных данными и исключались из рассмотрения.



*Рис. 6. Оценка точности классификации устойчивых и неустойчивых повреждений лесов пожарами на основе индекса  $SWVI_{DEV}$  при использовании различного количества измерений после пожара*

На основе полученных коэффициентов регрессионной модели и порога для отделения устойчивых повреждений лесов реализован автоматический метод, позволяющий оперативно оценивать состояние лесов после воздействия пожаров.

### Результаты применения метода

Разработанный метод был применен для оценки степени повреждения лесов пожарами на территории России в 2006–2012 гг., что позволило впервые получить однородные независимые оценки ежегодных последствий воздействия пожаров на леса страны (*табл. 1*). Всего за данный период огнем было пройдено 37,2 млн га покрытых лесом территорий. При этом суммарная площадь погибших и усыхающих насаждений в результате пожаров 2006–2012 г. составила 17,1 млн га или в среднем 2,5 млн га в год.

По данным Государственного лесного реестра по состоянию на 2012 г. площади учтенных гарей (т.е. участков леса, поврежденных огнем до степени прекращения роста) составляют 22,5 млн га. Если в качестве времени, необходимого для возобновления леса на гарях принять интервал 5–10 лет, то в среднем в категорию гарей ежегодно переходит от 2,2 до 4,5 млн га лесов, что не противоречит оценкам, полученным на основе разработанного метода.

Таблица 1. Площадь различных категорий повреждения лесов пожарами в 2006–2012 гг.

Год	Площади лесов различного состояния, тыс. га					
	Не обеспечены данными	Слабо поврежденные/ Ослабленные	Сильно ослабленные	Усыхающие	Погибшие	Всего
2006	10,6	2148,7	143,4	536,4	1295,1	4123,6
2007	45,8	1109,6	108,2	239,6	334,1	1791,5
2008	29,0	6223,3	232,8	848,0	1608,0	8912,0
2009	52,0	2333,4	177,8	530,2	901,9	3943,2
2010	77,9	1112,0	237,5	462,0	1019,2	2830,6
2011	232,0	1427,7	336,6	982,9	1364,7	4111,8
2012	172,5	2816,0	1066,2	3373,0	3639,0	11066,6

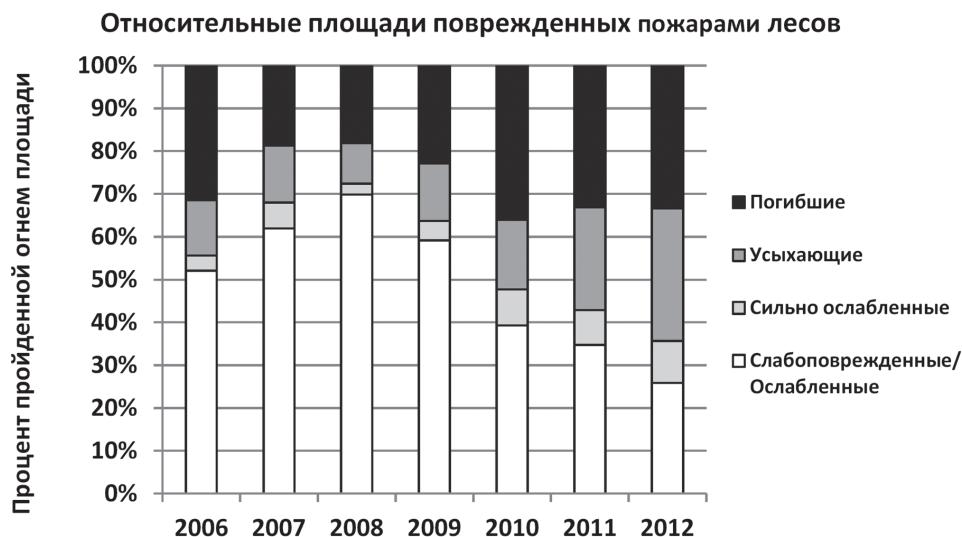


Рис. 7. Оценка относительной площади различных категорий повреждения лесов России пожарами в 2006–2012 гг.

Анализ распределения относительной площади повреждений лесов пожарами в разные годы показывает наличие начиная с 2008 г. тенденции роста доли погибших и усыхающих лесов (рис. 7). Причины данной тенденции требуют отдельного рассмотрения.

### Заключение

Определение степени повреждения лесов пожарами является важной составляющей информационного обеспечения лесного хозяйства и биосферных исследований. Предложенный в данной работе метод, обеспечивающий выделение четырех различных классов состояния пройденных огнем лесов на основе использования многолетних временных рядов спутниковых данных MODIS, впервые позволил получить однородные ежегодные оценки степени повреждения лесов пожарами в масштабах страны. В частности, установлено, что за последние 7 лет от пожаров погибло около 27% лесов, пройденных огнем, что составляет 10,2 млн га.

Представленные в работе результаты получены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Государственного контракта № 14.515.11.0007 на выполнение НИР по теме «Разработка методов дистанционного мониторинга природных пожаров для оценки их воздействия на окружающую среду и прогнозирования техногенных рисков» – Шифр: 2013-1.5-14-515-0039-021.

## Литература

1. *Барталев С.А., Егоров В.А., Ериков Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А.* Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектро-радиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 285–302.
2. *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.
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. *Крылов А.М., Владимирова Н.А.* Дистанционный мониторинг состояния лесов по данным космической съемки // Геоматика. 2011. № 3. С.53–57.
5. *Лупян Е.А., Савин И.Ю., Барталев С.А., Толпин В.А., Балашов И.В., Плотников Д.Е.* Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности («Вега») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С.190–198.
6. Руководство по проведению санитарно-оздоровительных мероприятий, утвержденные приказом Рослесхоза № 523 от 29.12.07.
7. *Ceccato P., Flasse S., Tarantol, S., Jacquemond S., Gregoire J.* Detecting vegetation water content using reflectance in the optical domain // Remote Sensing of Environment. 77. 2001. P. 22–33.
8. *Chaffer C.J., Noonan M., Macnaught E.* The post-fire measurement of fire severity and intensity in the Christmas 2001 Sydney Wildfires // International Journal of Wildland Fire. 13. 2004. P. 227–240.
9. *Chander G., Markham B.* Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and post-calibration dynamic ranges // IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 41. No. 11. November 2003. P. 2674–2677.
10. *Cocke A.E., Fule P.Z., Crouse J.E.* Comparison of burn severity assessments using Differenced Normalized Burn Ratio and ground data. International Journal of Wildland Fire. 14. 2005. P. 189–198.
11. *Díaz-Delgado R., Lloret F., Pons X.* Influence of fire severity on plant regeneration by means of remote sensing imagery // International Journal of Remote Sensing. 24. 2003. P. 1751–1763.

12. Doerr S.H., Shakesby R.A., Blake W.H., Chafer C.J., Humphrey, G.S., Wallbrink P.J. Effects of differing wildfire severities on soil wettability and implications for hydrological response // Journal of Hydrology. 319. 2006. P. 295–311.
13. Epting J., Verbyla D. L., Sorbel B. Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using Landsat TM and ETM+ // Remote Sensing of Environment. 96. 2005. P. 328–339.
14. Gao B. NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment. 58. 1996. P. 257–266.
15. García-Haro F.J., Gilabert M.A., and Meliá J. Monitoring fire-affected areas using thematic mapper data // International Journal of Remote Sensing. 22. 2001. P. 533–549.
16. Hammill K.A., Bradstock R.A. Remote sensing of fire severity in the Blue Mountains: Influence of vegetation type and inferring fire intensity // International Journal of Wildland Fire. 15. 2006. P. 213–226.
17. 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 – 55 (1–2). 2002. P. 235–249.
18. Key C., Benson, N. Landscape assessment, in fire effects monitoring (FireMon) and inventory protocol: Integration of standardized field data collection techniques and sampling design with remote sensing to assess fire effects // NPS-USGS National Burn Severity Mapping Project, 2002.
19. Landsat7 Science Data Users Handbook [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook/handbook\\_toc.html](http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook/handbook_toc.html), свободный доступ
20. Miller J.D., Thode A.E. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR) // Remote Sensing of Environment 109. 2007. P. 66–80.
21. Schroeder T., Cohen W., Song C., Canty M., Yang Z. Radiometric correction of multi-temporal Landsat data for characterization of early successional forest patterns in western Oregon // Remote Sensing of Environment. 103. 2006. P. 16–26.
22. White J.D., Ryan K.C., Key C.C., Running S.W. Remote sensing of forest fire severity and vegetation recovery // International Journal of Wildland Fire. 6. 1996. P. 125–136.

## **Post-fire forest tree mortality assessment method using MODIS satellite data**

**F.V. Stytsenko, S.A. Bartalev, V.A. Egorov, E.A. Loupian**

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

The study focused on post-fire tree mortality assessment in Russian forests using MODIS data. The method is based on relationship between in-situ and satellite data in near-infra-red (NIR) and short-wave-infra-red (SWIR) ranges of optical spectrum. Method allows post-fire forest dynamics assessment during given vegetation season in comparison to pre-fire multi-annual data. Method was used for fire-caused tree mortality assessment across entire country for years 2006–2012.

**Keywords:** remote sensing, multispectral satellite images, spectral vegetation index, forest fire, burn severity, forest condition.