Возможности пролонгированной оценки постпожарного состояния хвойных вечнозелёных лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений

Ф. В. Стыщенко¹, С. А. Барталев¹, А. В. Букась², Д. В. Ершов³, И. А. Сайгин¹

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*

² *Рослесозащита, Пушкино, 141202, Россия*

³ *Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН
Москва, 117997, Россия*

E-mails: bartalev@d902.iki.rssi.ru, saiginilya95@mail.ru, fedor@d902.iki.rssi.ru

Представленные в работе результаты исследований характеризуют возможности количественной оценки состояния повреждённых лесов через несколько лет после воздействия пожара по данным многоспектральных спутниковых измерений. Необходимые для исследований независимые опорные данные о повреждениях лесов были собраны в ходе наземных обследований тестовых участков в Амурской, Иркутской, Томской областях, республике Коми и Красноярского края. Выполненный анализ позволил сделать вывод о значительном влиянии процессов постпожарного восстановления напочвенного растительного покрова на измененные в вегетационный период спектрально-отражательные характеристики повреждённых лесов и, как следствие, о необходимости учёта данного фактора при дистанционной оценке степени их повреждения. Проведённые исследования позволили сделать вывод о принципиальной возможности использования спутниковых изображений, полученных в зимний период с наличием снежного покрова на земной поверхности, для оценки степени повреждения огнём хвойных вечнозелёных лесов. Преимущества спутниковых данных зимнего времени съёмки обуславливаются маскирующим эффектом снежного покрова, минимизирующего влияние пространственно неоднородных спектрально-отражательных характеристик напочвенной растительности на значения вегетационных индексов повреждённых пожарами лесов. Использование данных спутниковой съёмки в период с наличием снега на земной поверхности открывает возможности унифицированного применения установленных зависимостей между значениями вегетационных индексов и степенью повреждения пожарами хвойных вечнозелёных лесов для оценки многолетней динамики их состояния.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, многоспектральные спутниковые изображения, спектральные вегетационные индексы, лесные пожары, повреждения лесов

Одобрена к печати: 06.09.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-217-227

Введение

Пожары являются одним из наиболее мощных факторов воздействия на леса. Вызываемые пожарами последствия для древостоев могут варьировать от незначительных краткосрочных повреждений до полной их гибели в зависимости от вида, интенсивности и продолжительности воздействия огня, а также породного состава, возрастной структуры и других характеристик древостоев (Барталев и др., 2015). Оценка экономических и экологических последствий лесных пожаров требует своевременного получения объективных данных о состоянии повреждённых насаждений, в том числе о наличии в их составе усыхающих и погибших деревьев. Поскольку масштабы ежегодного воздействия пожаров на леса России измеряются миллионами гектаров (Лупян и др., 2017), данные дистанционного зондирования со спутников являются незаменимым инструментом получения оценок такого рода на больших территориях.

Выполненные ранее исследования показали возможность использования данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) со спутников для оценки последствий пожаров (Барталев и др., 2010, 2015; Allen, Sorbel, 2008; Cai et al., 2013; Cocke et al., 2005; Epting, Verbyla, 2005; Nouy et al., 2008; Isaev et al., 2002) и позволили разработать метод оценки характеристик

степени пирогенного повреждения лесов (Стыценко и др., 2013), основанный на использовании уравнения их взаимосвязи со значениями относительного разностного вегетационного индекса $RdSWVI$ лесного покрова, измеряемыми непосредственно в год пожара. Применение данного метода впервые позволило получить инструментальные оценки ежегодной пирогенной гибели лесов на всей территории России за продолжительный период (Барталев и др., 2015). Вышеупомянутые результаты не учитывают многолетний постпожарный отпад в лесах и могут частично не включать в себя погибшие от позднеосенних пожаров леса. Вопросы использования спутниковых данных для оценки состояния и динамики лесов в последующие за пожаром годы исследованы в меньшей степени. Очевидно, что спектрально-отражательные свойства повреждённых лесов могут меняться с течением времени, в частности за счёт развития напочвенного растительного покрова, способного вносить различный, в зависимости от структуры, плотности и состояния древостоев, вклад в регистрируемое сенсором отражённое оптическое излучение и, как следствие, влиять на получаемые дистанционно оценки их степени повреждения.

Настоящая работа направлена на исследование зависимостей между отражательными характеристиками лесов, измеренными спутниковыми приборами в течение нескольких лет после воздействия огня, и количественными индикаторами их состояния, полученными по результатам детальных наземных обследований.

Использование спектральных вегетационных индексов для оценки состояния повреждённых пожарами лесов

Широкое применение для оценки состояния растительности получили так называемые спектральные вегетационные индексы, основанные на использовании данных дистанционных измерений отражательных свойств земной поверхности в нескольких диапазонах длин волн. Исследования (Барталев и др., 2010; Allen, Sorbel, 2008; Cai et al., 2013; Cocke et al., 2005; Epting, Verbyla, 2005; Hoy et al., 2008) показали чувствительность некоторых вегетационных индексов к изменениям состояния наземных экосистем, повреждённых природными пожарами. Наибольшую корреляцию со степенью повреждения лесов пожарами продемонстрировали такие вегетационные индексы, как нормализованный разностный вегетационный индекс $NDVI$ (Normalized Difference Vegetation Index), коротковолновый вегетационный индекс $SWVI$ (Short Wave Vegetation Index), разностный индекс гарей NBR (Normalized Burn Ratio) и их модификации. В табл. 1 представлены основные вегетационные индексы, используемые для оценки последствий лесных пожаров.

Таблица 1. Спектральные вегетационные индексы, наиболее широко используемые при дистанционной оценке степени повреждения лесов пожарами

Название вегетационного индекса	Формула для вычисления вегетационного индекса
Нормализованный разностный вегетационный индекс	$NDVI = \frac{R_{nir} - R_{red}}{R_{nir} + R_{red}}$
Коротковолновый вегетационный индекс	$SWVI = \frac{R_{nir} - R_{sswir}}{R_{nir} + R_{sswir}}$
Разностный пожарный индекс	$NBR = \frac{R_{nir} - R_{swir}}{R_{nir} + R_{swir}}$
Разностный вегетационный индекс	$dVI = VI_{pre} - VI_{post}$
Относительный разностный вегетационный индекс	$RdVI = \frac{VI_{pre} - VI_{post}}{\sqrt{VI_{pre}}} \quad (1)$

Примечание: R_{nir} , R_{red} — значения коэффициента отражения в ближнем ИК и красном диапазоне спектра; R_{sswir} , R_{swir} — значения коэффициента отражения в среднем ИК-диапазоне на длинах волн близких к 1,6 и 2,2 мкм; VI_{pre} , VI_{post} — значения вегетационного индекса до и после пожара.

Спектральные вегетационные индексы, основанные на измерениях отражённого излучения в ближнем и среднем ИК-диапазонах, как правило, демонстрируют более высокую корреляцию со степенью повреждения лесов пожарами (Барталев и др., 2017). К числу таких индексов относятся SWVI и NBR. В наших исследованиях мы не обнаружили существенной разницы между данными индексами и в дальнейшем использовали индекс SWVI и его разновременные разновидности. Проведённый нами анализ (Барталев и др., 2015) показал, что для лесорастительных условий России высокую корреляцию с наземными оценками степени пирогенного повреждения лесов продемонстрировали индексы dSWVI и RdSWVI.

Получение опорных наземных данных о степени повреждения лесов пожарами

Исследования опирались на данные наземных обследований повреждённых пожарами лесов в Амурской, Иркутской и Томской областях, Республике Коми и Красноярском крае. Наземные обследования повреждённых пожарами насаждений в период 2010–2013 гг. были проведены в июле и сентябре 2015 г. Предварительно на основе полученных спутниковой системой Landsat-OLI изображений была выполнена стратификация повреждённых огнём участков по значениям спектрального индекса RdSWVI. Это позволило провести целенаправленный выбор мест закладки пробных площадей, охватывающих широкий диапазон состояния лесов: от слабых повреждений древостоев до полной их гибели. Информация о тестовых участках и сборе опорных данных представлена в табл. 2.

Таблица 2. Характеристика тестовых участков и использованных изображений высокого пространственного разрешения

Субъект РФ	Число пробных площадей	Время действия пожаров	Дата наземного обследования	Даты спутниковой съёмки		Преобладающие древесные породы
				до пожара	после пожара	
Амурская обл. (АО)	17	Май 2012 г.	07.07.2015	27.06.2011	22.06.2015	Берёза
Иркутская обл. (ИО)		Май 2011 г.	08.09.2015	23.07.2009	23.07.2015	Сосна, липа, берёза, пихта, ольха, ель и лиственница
Красноярский край (КК)		Июнь 2012 г.	01.07.2015	01.08.2011	12.08.2015	Кедр и пихта
Республика Коми (РК)		Июль 2013 г.	25.07.2015	29.06.2013	06.08.2015	Сосна и ель
Томская обл. (ТО)		Июнь 2012 г.	02.09.2015	06.07.2012	20.08.2015	Берёза и осина

Наземные обследования проводились специалистами Российского центра защиты леса на пробных площадях. Для каждой пробной площади определялась порода и категория состояния каждого дерева, а также проводилась фотофиксация. При этом выделялись следующие категории состояния деревьев: здоровые (1); ослабленные (2); сильно ослабленные (3); усыхающие (4); сухостой текущего года (5); сухостой прошлых лет (6). На основе полученных данных для каждой пробной площади рассчитывалась средневзвешенная категория состояния (СКС), характеризующая интегральное состояние повреждённых лесов (<https://legalacts.ru/doc/prikaz-rosleskhoza-ot-29122007-n-523-ob/#100013>):

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

где K_i — число деревьев i -й категории состояния деревьев согласно лесопатологической классификации.

Традиционно выделяют 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.

Всего было заложено 85 пробных площадей в повреждённых пожарами хвойных и лиственных лесах. Полученная таким образом база опорных данных составила основу для исследований возможностей оценки состояния повреждённых пожарами лесов через несколько лет после воздействия огня на основе использования спутниковых данных ДЗЗ.

Дальнейший анализ поводился на основе данных спутниковых систем Landsat-ETM+ и Landsat-OLI-TIRS. На исследуемые участки были подобраны безоблачные изображения, полученные до пожара и через несколько лет после него в устойчивые периоды вегетации (см. табл. 1), позволившие получить разновременные данные о спектральной отражательной способности повреждённых пожарами участков с последующим расчётом вегетационных индексов.

Исследование отражательной способности повреждённых лесов через несколько лет после пожара по спутниковым изображениям летнего периода

В ходе исследования были получены зависимости показателя СКС от вегетационного индекса RdSWVI, рассчитанного в соответствии с формулой (1), представленной в табл. 1. Итоговые уравнения сравнивались с полученной ранее зависимостью (Барталев и др., 2015):

$$CKC = 7,58RdSWVI + 1,47, \quad (3)$$

основанной на данных измерений отражательной способности лесов непосредственно после воздействия огня до начала активного восстановления напочвенного растительного покрова.

Результаты показали наличие линейной зависимости параметра СКС от индекса RdSWVI с достаточно высоким коэффициентом детерминации R^2 , составившим на различных тестовых участках следующие значения: 0,91 (АО); 0,75 (ИО); 0,63 (ТО); 0,86 (ПК) и 0,87 (КК). При этом коэффициенты уравнения связи СКС и индекса RdSWVI для различных регионов и типов леса демонстрируют значительную изменчивость. В частности, для Амурской обл., где преобладают лиственные насаждения (в основном берёза), зависимость параметра СКС от индекса RdSWVI с течением времени изменяется и показывает отклонение от уравнения (1). Это вызвано относительно высокой скоростью восстановления напочвенного растительного покрова в лиственных лесах Амурской обл. (рис. 1, см. с. 221).

При исследовании повреждённых пожарами лесов с преобладанием хвойных вечнозелёных пород обнаружено, что зависимость СКС от RdSWVI может значительно различаться на разных участках с сохранением линейного вида. При этом основной причиной обнаруженных различий является процесс восстановления напочвенного растительного покрова и связанное с этим изменение спектрально-отражательных характеристик лесного полога. На рис. 2 (см. с. 221) показаны различающиеся графики зависимостей СКС от RdSWVI на тестовых участках в Республике Коми и Красноярском крае, а также соответствующие им наземные фотографии погибших лесов ($CKC = 5$), иллюстрирующие влияние напочвенного растительного покрова как фактора выявленных различий.

Рис. 1. Зависимость СКС повреждённых пожарами лесов на тестовом участке в Амурской обл. от RdSWVI по данным Landsat-OLI, полученным через два года после пожара (серая линия). Для сравнения на график нанесено уравнение зависимости СКС от RdSWVI по данным съёмки непосредственно после пожара (чёрная линия) (Барталев и др., 2015)

Рис. 2. Графики связи значений СКС и RdSWVI повреждённых огнём лесов на тестовых участках в Республике Коми и Красноярском крае (серая линия) в сравнении с аналогичной зависимостью, полученной по данным съёмки непосредственно в год пожара (чёрная линия) (Барталев и др., 2015). Степень постпожарного восстановления напочвенного растительного покрова иллюстрируется наземными фотографиями пробных площадей (СКС = 5) соответствующих тестовых участков

Исследования показывают, что изменения, вызванные восстановлением напочвенного растительного покрова, могут оказывать значительное влияние на уравнения связи параметра СКС со значениями спектральных вегетационных индексов.

Использование исключительно летних данных не применимо для долгосрочного мониторинга динамики состояния повреждённых пожарами лесов, так как изображения за летний период не учитывают факторы постпожарного восстановления напочвенного растительного покрова. Данный вопрос является важным направлением для дальнейших исследований.

Исследование отражательной способности повреждённых пожарами хвойных лесов по спутниковым изображениям зимнего периода съёмки

В лесах России площадь лесов с преобладанием вечнозелёных темнохвойных и светлохвойных пород составляет соответственно около 12 и 14 % (Барталев и др., 2016). В отличие от лиственных лесов, степень дефолиации и дехромации вечнозелёных хвойных деревьев может являться достаточно информативным критерием оценки их состояния в течение всего года. В этой связи для оценки состояния вечнозелёных лесов могут быть использованы спутниковые изображения зимнего периода съёмки, преимущество которых заключается в маскировании земной поверхности снежным покровом. При этом процессы дефолиации и дехромации хвойных насаждений, предположительно, могут оказывать основное влияние на изменения отражательных характеристик лесов, измеряемых в зимний период при наличии снежного покрова на земной поверхности. Для проверки этого предположения была исследована возможность использования спутниковых изображений при наличии снега на земной поверхности для пролонгированной (многолетней) оценки степени повреждения хвойных вечнозелёных лесов на основе общего уравнения взаимосвязи характеристик состояния насаждений и его дистанционных индикаторов.

Для проведения исследований в Республике Коми и Красноярском крае использовались изображения тестовых участков с наличием снежного покрова на земной поверхности, полученные системами Landsat-OLI и Landsat-ETM+ до и после воздействия пожаров. В *табл. 3* приведены даты спутниковых снимков, использованных для анализа отражательных характеристик повреждённых пожарами лесов.

Таблица 3. Характеристика спутниковых изображений (Landsat-ETM+ и Landsat-OLI) для проведения исследований

Тестовый регион	Число пробных площадей	Даты пожаров	Даты наземного наблюдения	Даты спутниковой съёмки для оценки отражательных характеристик лесов			Преобладающая древесная порода
				Предпожарная оценка	Оперативная постпожарная оценка	Пролонгированная постпожарная оценка	
Красноярский край	17	июнь 2012 г.	01.07.2015	24.03.2010	04.04.2012	06.04.2015	Кедр, пихта
Республика Коми		июль 2013 г.	25.07.2015	10.04.2013	21.03.2014	25.03.2016	Сосна, ель

Была исследована возможность использования различных вегетационных индексов, полученных на основе спутниковых данных зимнего периода съёмки, таких как NDVI, SWVI, dNDVI, dSWVI, RdNDVI и RdSWVI. Значения спектральных вегетационных индексов сравнивались с результатами наземной оценки показателя состояния лесов СКС. Устойчивой зависимости параметра СКС от индексов dSWVI и RdSWVI обнаружено не было (R^2 составил 0,21 и 0,33 соответственно). Это связано с тем, что снежный покров характеризуется сильным поглощением в средней ИК-области, используемой для оценки вегетационного индекса SWVI, одновременно демонстрируя в данном диапазоне длин волн значительную изменчивость характеристик отражательного излучения в зависимости от насыщения снега водой (Черепанов, Дружинина, 2009). Таким образом, использование индекса RdSWVI для оценки степени повреждения лесов на основе зимних изображений представляется нецелесообразным.

Для анализа были также использованы индексы NDVI, dNDVI и RdNDVI, основанные на отражательной способности лесов в красном и ближнем ИК-диапазонах спектра. На *рис. 3* показан график зависимости СКС от индекса RdNDVI, полученного по данным зимнего периода съёмки в Республике Коми и Красноярском крае.

Рис. 3. Графики зависимости СКК от индекса RdNDVI по данным зимнего периода съёмки сразу (чёрный цвет) и через несколько лет (серый цвет) после воздействия пожаров на леса тестовых участков в Республике Коми (а) и в Красноярском крае (б)

По результатам исследования было установлено наличие близкой к линейной связи значений СКК и RdNDVI, обладающей сходными значениями коэффициентов уравнения для двух разных тестовых участков (см. рис. 3). Значения коэффициента детерминации при этом составили 0,85 для обоих тестовых участков. Полученные результаты позволяют сделать вывод о принципиальной возможности использования данных спутниковой съёмки с наличием снежного покрова на земной поверхности для оперативной оценки степени повреждения хвойных вечнозелёных лесов пожарами. При этом проведенный анализ указывает на целесообразность использования спектрального вегетационного индекса RdNDVI, полученного по данным спутниковой съёмки в зимнее время. Кроме того, полученные в этот период спутниковые изображения в значительной мере свободны от влияния изменчивости отражательных характеристик напочвенного растительного покрова. Данный вегетационный индекс может быть использован для пролонгированной оценки состояния хвойных вечнозелёных лесов в течение нескольких лет после воздействия пожара для долгосрочного их мониторинга.

По результатам экспериментов предложено использование уравнения связи $СКК = 10,34RdNDVI + 1,8$, построенного на основе объединённого набора данных для тестовых участков в Республике Коми и Красноярском крае (рис. 4).

Рис. 4. Взаимосвязь между показателями СКК и RdNDVI, полученная на основе объединённого набора экспериментальных данных

В рамках исследования было проведено сравнение результатов оценки показателя СКС на основе полученных зависимостей от значений вегетационных индексов RdNDVI и RdSWVI, рассчитанных по данным спутниковой съёмки непосредственно после пожара. В результате были получены изображения с оценкой СКС лесов по двум разным уравнениям, показывающие довольно высокий уровень согласованности (рис. 5).

Рис. 5. Изображения значений СКС для повреждённого пожаром участка леса в Республике Коми: *а* — по данным съёмки летнего периода (29.06.2013 и 06.08.2015); *б* — по данным съёмки зимнего периода (10.04.2013 и 25.03.2016)

На исследуемой территории в Республике Коми был выделен тестовый участок хвойных вечнозелёных лесов, на котором представлены леса, в различной степени повреждённые пожаром, и построена двумерная гистограмма значений СКС, полученных двумя различными методами (рис. 6).

Рис. 6. Сравнение значений СКС повреждённых пожаром лесов, полученных на основе двух различных методов оценки

Несмотря на имеющийся разброс, значительная часть пикселей лежит вблизи линии $y = x$, что говорит о высоком уровне согласованности результатов оценки СКС повреждённых пожарами лесов двумя различными методами.

Выводы

Выполнено исследование отражательных свойств повреждённых пожарами лесов с использованием результатов детальных наземных обследований насаждений на тестовых участках в Амурской, Иркутской и Томской областях, в Республике Коми и Красноярском крае. Результаты показывают, что для всех обследованных тестовых участков установлено наличие близкой к линейной взаимосвязи между значениями категории состояния лесов и величинами спектрального вегетационного индекса $RdSWVI$, рассчитанного на основе данных спутниковых измерений их отражательной способности. При этом было обнаружено, что коэффициенты уравнений этой связи могут сильно различаться для разных тестовых участков в зависимости от хода процессов постпожарного восстановления напочвенного растительного покрова. Это обстоятельство ограничивает использование индекса $RdSWVI$ для пролонгированной оценки степени повреждения лесов через несколько лет после воздействия огня без внесения соответствующих корректировок в уравнение.

Была исследована возможность пролонгированной оценки состояния хвойных вечнозелёных лесов через несколько лет после воздействия пожара на основе спутниковых изображений с наличием снежного покрова на земной поверхности, минимизирующего влияние напочвенного растительного покрова на спектрально-отражательные характеристики лесов. Выполненные исследования показывают, что полученное на основе зимних спутниковых изображений уравнение связи между степенью повреждения лесов и значениями вегетационных индексов характеризуется высоким уровнем согласованности оперативных и пролонгированных оценок для двух тестовых участков. Полученные результаты позволяют сделать вывод о целесообразности использования спутниковых изображений зимнего периода съёмки для оценки последствий воздействия огня на хвойные вечнозелёные леса.

Исследования проведены при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-77-30015) с использованием инфраструктуры Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015).

Литература

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-176-193.
5. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашицкий А. В., Мазуров А. А., Матвеев А. М., Суднева О. А., Сычуглов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. 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.

6. *Луян Е. А., Барталев С. А., Балашов И. В., Егоров В. А., Еришов Д. В., Кобец Д. А., Сенько К. С., Стыцено Ф. В., Сычугов И. Г.* Спутниковый мониторинг лесных пожаров в 21 веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активного горения) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14. № 6. С. 158–175. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.
7. *Стыцено Ф. В., Барталев С. А., Егоров В. А., Луян 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.
8. *Черепанов А. С., Дружинина Е. Г.* Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // *Геоматика*. 2009. № 3. С. 28–32.
9. *Allen J. L., Sorbel B.* Assessing the differenced Normalized Burn Ratio's ability to map burn severity in the boreal forest and tundra ecosystems of Alaska's national parks // *Intern. J. Wildland Fire*. 2008. V. 17. P. 463–475.
10. *Cai W., Yang J., Liu Z., Hu Y., Weisberg P. J.* Post-fire tree recruitment of a boreal larch forest in Northeast China // *Forest Ecology and Management*. 2013. V. 307. P. 20–29. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.06.056.
11. *Cocke E. A., Fule P. Z., Crouse J. E.* Comparison of burn severity assessments using the Differenced Normalized Burn Ratio and ground data // *Intern. J. Wildland Fire*. 2005. V. 14. P. 189–198.
12. *Epting J., Verbyla D.* Landscape-level interactions of prefire vegetation, burn severity, and postfire vegetation over a 16-year period in interior Alaska // *Canadian J. Forest Research*. 2005. V. 35. P. 1367–1377. DOI: 10.1139/x05-060.
13. *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.
14. *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(1–2). P. 235–249.

The possibilities of prolonged burnt severity assessment of evergreen coniferous forest using multi-spectral satellite data

F. V. Stytsenko¹, S. A. Bartalev¹, A. V. Bukas², D. V. Ershov³, I. A. Saigin¹

¹ *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*

² *Russian Centre of Forest Health, Pushkino 141202, Russia*

³ *Centre for Forests Ecology and Productivity RAS, Moscow 117997, Russia*

E-mails: bartalev@d902.iki.rssi.ru, saiginilya95@mail.ru, fedor@d902.iki.rssi.ru

The results of experimental studies presented in this paper characterize the possibility of quantitative assessment of the damaged forests state in a few years after the fire according to multispectral satellite measurements. The necessary independent reference data on forest damage were collected during the ground surveys of test sites in the Amur, Irkutsk, Tomsk Regions, the Republic of Komi and the Krasnoyarsk Territory. The analysis made it possible to draw a conclusion about the significant influence of the processes of post-fire restoration of ground vegetation cover on the spectral-reflective characteristics of damaged forests measured during the vegetation period, and, as a consequence, the need to take this factor into account in the remote assessment of their degree of damage. The conducted research allowed drawing a conclusion about the principal possibility of using satellite images obtained in winter with the presence of snow cover on the earth's surface to assess the degree of fire damage to coniferous evergreen forests. The advantages of using satellite data of the winter survey period are due to the masking effect of snow cover, minimizing the influence of spatially inhomogeneous spectral-reflective characteristics of ground vegetation on the values of vegetation indices damaged by forest fires. The use of satellite imagery data in the period with the presence of snow on the earth's surface opens up the possibility of a unified application of the established dependencies between the values of vegetation indices and the degree of damage by fires of coniferous evergreen forests to assess the long-term dynamics of their condition.

Keywords: remote sensing, multi-spectral satellite images, spectral vegetation index, forest fire, burn severity, forest status

Accepted: 06.09.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-217-227

References

1. 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.
2. 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.
3. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p.
4. Bartalev S. A., Stytsenko F. V., Khvostikov S. A., Loupian E. A., Metodologiya monitoringa i prognozirovaniya pirogennoi gibeli lesov na osnove dannykh sputnikovykh nablyudenii (Methodology of post-fire tree mortality monitoring and prediction using remote sensing data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 176–193. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-176-193.
5. 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.
6. Loupian E. A., Bartalev S. A., Balashov I. V., Egorov V. A., Ershov D. V., Kobets D. A., Senko K. S., Stytsenko F. V., Sychugov I. G., Sputnikovyi monitoring lesnykh pozharov v 21 veke na territorii Rossiiskoi Federatsii (tsifyry 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)), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 158–175, DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.
7. 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.
8. Cherepanov A. S., Druzhinina E. G., Spektral'nye svoystva rastitel'nosti i vegetatsionnye indeksy, *Geomatics*, 2009, No. 3, pp. 28–32.
9. Allen J. L., Sorbel B., Assessing the differenced Normalized Burn Ratio's ability to map burn severity in the boreal forest and tundra ecosystems of Alaska's national parks, *Intern. J. Wildland Fire*, 2008, Vol. 17, pp. 463–475.
10. Cai W., Yang J., Liu Z., Hu Y., Weisberg P. J., Post-fire tree recruitment of a boreal larch forest in Northeast China, *Forest Ecology and Management*, 2013, Vol. 307, pp. 20–29, DOI: 10.1016/j.foreco.2013.06.056.
11. Cocke E. A., Fule P. Z., Crouse J. E., Comparison of burn severity assessments using the Differenced Normalized Burn Ratio and ground data, *Intern. J. Wildland Fire*, 2005, Vol. 14, pp. 189–198.
12. Epting J., Verbyla D., Landscape-level interactions of prefire vegetation, burn severity, and postfire vegetation over a 16-year period in interior Alaska. *Canadian J. Forest Research*, 2005, Vol. 35, pp. 1367–1377, DOI: 10.1139/x05-060.
13. 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, Vol. 17, pp. 500–514.
14. 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, Vol. 55, No 1–2, pp. 235–249.