

Спутниковый мониторинг состояния лесной растительности после воздействия пожаров в Забайкальском крае

Е. Г. ШВЕЦОВ¹, Е. А. КУКАВСКАЯ¹, Л. В. БУРЯК²

¹ Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28

² Сибирский государственный технологический университет
660049, Красноярск, просп. Мира, 82
E-mail: eugeneshvetsov11@yandex.ru

Статья поступила 02.03.16

Принята к печати 25.04.16

АННОТАЦИЯ

По данным радиометра MODIS для юго-западных районов Забайкальского края проведена оценка нарушенности лесных земель пожарами. Сопряженный анализ вегетационных индексов, полученных на основе измерений отраженного излучения в ближнем и среднем инфракрасном диапазонах спектра, и материалов наземных исследований позволил выделить на нарушенных пожарами лесных землях участки с успешным и недостаточным лесовозобновлением. На основании инструментальных данных установлено, что повторные пожары препятствуют успешному восстановлению лесов. Анализ сезонной динамики указывает на то, что летние пожары приводят к более значительным повреждениям лесной растительности по сравнению с весенними. На лиственничные насаждения, преобладающие в регионе, приходится основная доля нарушенных пожарами участков земель (в том числе наибольшая площадь, где процессы возобновления затруднены), в то время как сосновые и лиственные насаждения характеризуются большей частотой пожаров.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, лесные пожары, вегетационные индексы, лесовозобновление.

Пожары являются одним из наиболее значимых факторов воздействия на леса в России. Ежегодно воздействию пожаров подвергаются леса на площади в несколько миллионов гектаров, со значительным возрастанием площадей, пройденных огнем, в отдельные годы [Швиденко и др., 2011; Пономарев, Швецов, 2013; Барталев и др., 2015]. В условиях меняющегося климата следует также ожидать ужесточения пожарных режи-

мов на территории Сибири [Швиденко, Щепаченко, 2013]. В настоящее время уже наблюдается рост продолжительности пожароопасных сезонов и частоты возникновения пожаров для ряда регионов России, в особенности лесов юга Сибири [Malevsky-Malevich et al., 2008; Буряк и др., 2011]. При этом горимость территории Забайкальского края характеризуется как одна из наиболее высоких в России [Kukavskaya et al., 2013;

Курганович, Макаров, 2015]. Кроме того, в последнее время для Забайкальского края характерными становятся повторные пожары с периодичностью значительно ниже срока прохождения полного цикла развития коренных фитоценозов после воздействия пожара, что приводит к трансформации лесных экосистем в нелесные [Kukavskaya et al., 2013].

В настоящее время использование спутниковых средств дает возможность ежедневно и многократно наблюдать большие территории, что позволяет выполнять оценку степени нарушенности лесов пожарами и проводить мониторинг послепожарной динамики лесных экосистем. Вызываемые пожарами изменения отражательной способности растительности в видимом, ближнем и среднем инфракрасном (ИК) диапазонах электромагнитного спектра являются физической основой для оценки степени пирогенной нарушенности лесных экосистем [Дейвис и др., 1983; Hunt, Rock, 1989; Gao, 1996]. На этом основано применение вегетационных индексов – показателей, рассчитываемых как комбинации измерений отраженного излучения, сделанных в различных спектральных диапазонах. Наиболее распространенный вегетационный индекс – NDVI является нормализованной разностью отраженного излучения в красном и ближнем ИК диапазонах спектра, чувствителен к изменениям содержания хлорофилла в листьях растений [Tucker, 1979]. В то же время индексы, рассчитываемые по измерениям отраженного излучения в ближнем и среднем ИК диапазонах, например, SWVI, чувствительны к содержанию воды в кронах деревьев [Gao, 1996].

Помимо использования вегетационных индексов, рассчитанных для отдельных спутниковых снимков, широкое применение находят также разностные вегетационные индексы, характеризующие изменение состояния растительности до и после пожара [Егоров и др., 2006; Miller, Thode, 2007].

Вегетационные индексы, использующие измерения отраженного излучения в ближнем и среднем ИК диапазонах, имеют более высокую корреляцию со степенью повреждения лесов пожарами по сравнению с NDVI. В частности, разностные вегетационные индексы dSWVI и RdSWVI предпочтительны для

выявления поврежденных пожарами лесов [Барталев и др., 2010].

На протяжении последних 20 лет данные космического дистанционного зондирования находят широкое применение не только для оценки площади, пройденной пожарами, и пирогенных повреждений, но и для мониторинга послепожарного возобновления растительности. Для различных районов разработаны и апробированы методы детектирования интенсивности пирогенного воздействия на основе спутниковых данных и наземных обследований и получены связи параметров пожаров с послепожарным состоянием лесных экосистем [Fiorella, Ripple, 1993; Mitri, Gitas, 2010; Barrett et al., 2010, 2011; Jin et al., 2012].

Основная цель данной работы – оценка нарушенности земель лесного фонда Забайкальского края и успешности лесовозобновления на участках лесных земель, пройденных пожарами.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Территория Забайкальского края характеризуется преобладанием среднегорий с высотами 1000–1900 м. Характерной чертой рельефа является чередование горных хребтов и межгорных долин (500–800 м). Климат на территории Забайкальского края резко континентальный, отличается значительными суточными и сезонными перепадами температур (в некоторых районах годовая амплитуда составляет более 90 °С), малым количеством осадков (от 300 мм на юге и юго-востоке до 600 мм в горах на севере, юго-западе и востоке) и неравномерным их распределением в течение года (до 80–90 % приходится на летне-осенний период). На территории Забайкальского края выделено четыре лесных района: Байкальский горный лесной район, Забайкальский горно-мерзлотный район, Забайкальский горный лесной район и Забайкальский лесостепной район. В составе древостоев преобладает лиственница Гмелина и сосна обыкновенная [Советский союз..., 1969; Энциклопедия..., 2000; Кулаков, 2009].

Исследования проводились для юго-западных районов Забайкальского края (рис. 1), которые характеризуются самой высокой степенью пирогенной нарушенности.

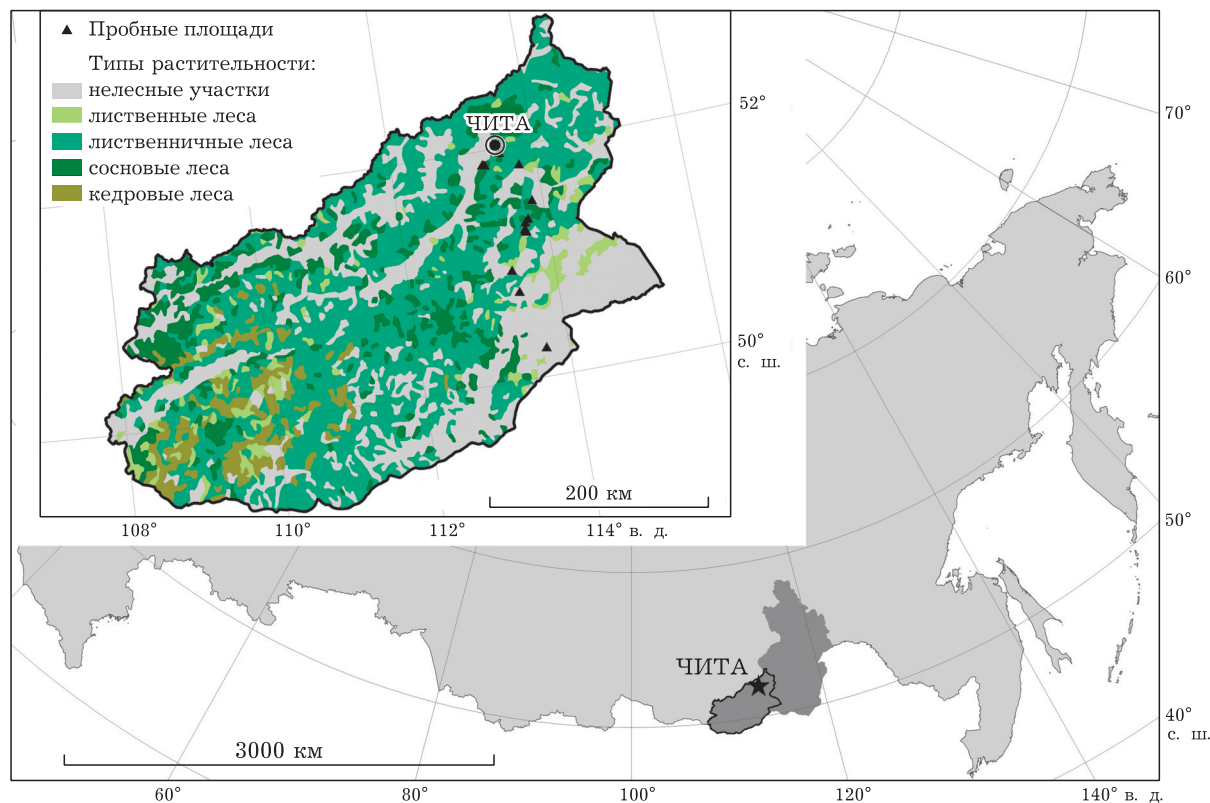


Рис. 1. Расположение района исследования на территории Забайкальского края. Указаны типы растительности согласно карте растительности СССР 1990 г. и отмечено расположение пробных площадей

В качестве источника информации об отражательной способности земной поверхности, а также о месте и дате возникновения пожаров в работе использовались продукты, формируемые по данным радиометра MODIS, установленного на космических аппаратах TERRA и AQUA.

Для расчета вегетационных индексов использовались продукты MCD43A4/MCD43A2 коллекции 5 с пространственным разрешением 500 м [Schaaf et al., 2002], содержащие измерения отражательной способности поверхности в 1–7 каналах MODIS (диапазон длин волн от 0,46 до 2,15 мкм), а также показатели качества полученных данных.

Продукты MOD14A1/MYD14A1 коллекции 5 [Giglio, 2013] с пространственным разрешением 1000 м использовались для получения информации о расположении очагов активных пожаров. Для использования этих данных, совместно с продуктами MCD43A4/MCD43A2, производилось их приведение к пространственному разрешению 500 м.

При определении преобладающего типа растительности применялась карта растительности СССР 1990 г. [Растительность..., 1990]. В соответствии с данной картой лиственничники занимают 46 % рассматриваемого района, насаждения с преобладанием сосны – около 12 %, лиственные леса, представленные главным образом березой – около 6 %.

В качестве индикатора степени повреждения лесов пожарами использовался коротковолновый вегетационный индекс (SWVI), который рассчитывался по данным каналов 2 (0,86 мкм) и 6 (1,64 мкм) радиометра MODIS.

В работе анализировался период с 2000 по 2015 г. Для каждого сезона формировались временные ряды вегетационного индекса с конца мая по конец августа (145–241 дни года). Используя флаги контроля качества продукта, из временных рядов исключались измерения, подверженные влиянию облаков и дыма. Затем полученные временные ряды усреднялись. Таким образом, для каждого пикселя в пределах рассматриваемой облас-

ти имелось 16 итоговых значений индекса SWVI. Кроме этого, по данным продуктов MOD14A1/MYD14A1 за каждый год формировалась итоговая маска пожаров, объединявшая все пиксели, содержавшие очаги активного горения, которые регистрировались в течение пожароопасного сезона (с апреля по октябрь).

Определение сезона, в котором имело место наибольшее повреждение растительности огнем, выполнялось на основании полученных ранее временных рядов индекса SWVI и масок активных пожаров. По данным продуктов MOD14A1/MYD14A1 для каждого пикселя определялись сезоны, когда в нем регистрировались пожары, после чего для каждого такого сезона рассчитывалось значение разностного индекса dSWVI как разность между значением SWVI в год, предшествовавший пожару, и в следующий после пожара год. Если пожар регистрировали в 2015 г., то в качестве послепожарного значения SWVI брали значение 2015 г. Год, в котором пожары привели к наибольшим повреждениям растительности, определялся на основании максимального значения индекса dSWVI.

Для оценки успешности лесовозобновления анализировался временной ряд вегетационного индекса после воздействия пожара. Для данного участка временного ряда индекса SWVI рассчитывались параметры уравнения линейного тренда, при этом предполагалось, что угловой коэффициент линии связан с успешностью возобновления. Расчет параметров уравнения тренда ограничивался пожарами 2009 г., таким образом, для расчета использовались значения индекса SWVI, по крайней мере, за 6 лет.

В качестве контрольных значений для оценки успешности лесовозобновления после пожаров использовались данные наземных обследований, проведенных на 16 пробных площадях (см. рис. 1).

При наземных обследованиях на пробных площадях определены лесоводственно-таксационные характеристики насаждений и проведено лесопирологическое описание участков лесных земель с использованием общепринятых в практике лесоведения, лесной таксации и пирологии методик [Сукачев, Зонн, 1961; Курбатский, 1970; Анучин, 1982].

Для оценки успешности лесовозобновления на каждой пробной площади вели описание и учет подроста и самосева на 15–20 учетных площадках размером 2 × 2 м в соответствии с рекомендациями А. И. Бузькина и А. В. Побединского [1963]. При учете возобновления для каждой породы оценивались количественные и качественные характеристики подроста, в том числе его возраст, высота и состояние (благонадежный, сомнительный и усохший).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Использование временных рядов данных MODIS позволило оценить периодичность пожаров на исследуемой территории и степень их воздействия на лесную растительность. Для каждого из преобладающих типов растительности определены площади пожаров за рассматриваемый период, а также степень нарушенности, исходя из значений индекса dSWVI. На основании полученных растровых слоев, содержащих информацию о зарегистрированных активных пожарах, для каждого 500-метрового пикселя рассчитано количество сезонов, когда в нем регистрировались очаги горения (рис. 2). Так, для категории сосновых лесов общая площадь, пройденная пожарами за период с 2000 по 2015 г., составила около 914 тыс. га (60 % от общей площади сосновых лесов в районе

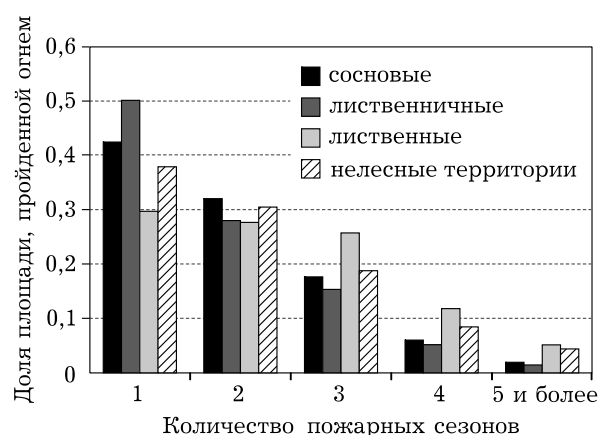


Рис. 2. Доля площади, пройденной огнем, в зависимости от количества сезонов, когда в данном пикселе регистрировались пожары. Настоящий показатель рассчитывался относительно общей площади, пройденной огнем, в этом типе леса за период 2000–2015 гг.

исследования), при этом в 58 % пикселей, пройденных огнем, пожары регистрировались два и более раз. В целом за этот период площадь, пройденная пожарами более одного раза, в сосновых насаждениях превысила 500 тыс. га (34 % от площади сосновых лесов). Для лиственных лесов общая площадь пожаров за рассмотренный период составила около 3,1 млн га (51 % от площади лиственных лесов), а для лиственных лесов – более 380 тыс. га (48 % от площади лиственных лесов), при этом площади, пройденные огнем 2 раза и более, составили 1,6 млн (27 %) и около 270 тыс. га (34 %) соответственно.

Наибольшая частота появления пикселей, где пожары регистрировались в нескольких сезонах, приходится на нелесные земли. Почти 70 % пикселей, относящихся к данной категории, пройдены огнем более одного раза. При этом следует отметить, что реальная частота пожаров на данных землях может быть еще выше. Это обусловлено спецификой возгораний на нелесных участках [Пономарев, Швецов, 2013], где значительная часть пожаров распространяется в течение непродолжительного периода времени и, вследствие этого, может не регистрироваться спутниками из-за наличия облачного покрова в момент прохода спутника. Кроме того, в данной работе анализировались данные по активным пожарам за период с апреля по октябрь каждого года, в то время как возгорания на нелесных землях могут регистрироваться начиная с марта.

При оценке послепожарного состояния насаждений, согласно данным С. А. Барталева с соавт. [2010], принималось, что пройденные пожарами леса, для которых величина спектрального вегетационного индекса dSWVI составляет менее 0,2, относятся к категории ослабленных или сильно ослабленных.

Для лесных территорий юго-западной части Забайкальского края на основной части (более 80 %) пожарных пикселей зафиксированы пожары, не приводящие к существенным повреждениям растительного покрова (индекс dSWVI не более 0,2). При этом летние пожары чаще приводили к более значительным изменениям растительного покрова по сравнению с весенними (рис. 3). Так, после воздействия летних пожаров почти 30 %

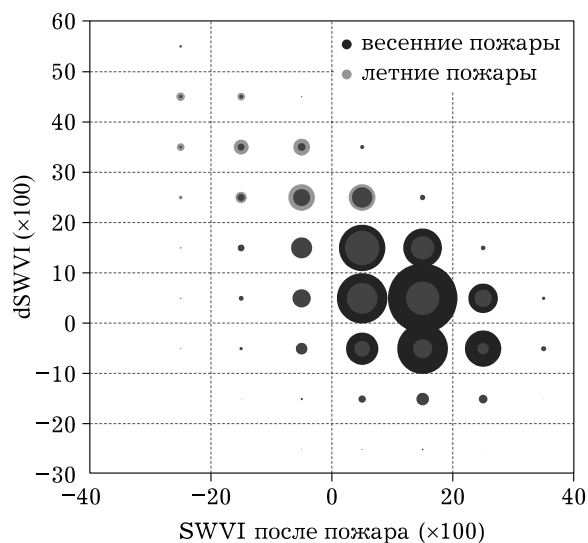


Рис. 3. Диаграмма распределения числа пожарных пикселей в зависимости от индекса dSWVI и послепожарного значения SWVI. Размер кругов соответствует количеству пикселей. При построении диаграммы не учитывались пожары на нелесных землях

всех пожарных пикселей имели значения dSWVI более 0,2, в то время как для весенних пожаров эта величина составила менее 10 %. На рис. 3 левая верхняя область диаграммы, соответствующая наиболее сильным пирогенным повреждениям растительности, представлена главным образом участками, пройденными летними пожарами. В то же время максимум горимости в рассматриваемом районе приходится на весну (более 70 % от общей площади, пройденной пожарами). Большая степень повреждения древостоев после воздействия летних пожаров, в отличие от весенних, подтверждается и данными других исследователей [Фурьев, 1996; Буряк и др., 2003; Krylov et al., 2014; Барталев и др., 2015].

С другой стороны, участки лесных земель, на которых после воздействия пожаров произошло усыхание и гибель древостоев, могут характеризоваться dSWVI от 0,35 и более [Барталев и др., 2010]. В среднем доля таких пожаров составляет порядка 3 % от общей площади, пройденной огнем. При этом выше 9 % летних пожаров имеют значения dSWVI более 0,35, а в случае весенних пожаров их доля составляет менее 1 %.

В соответствии со значениями индекса dSWVI выделены следующие категории на-

рушенности лесных земель: слабая ($dSWVI < 0,2$), средняя ($0,2 \leq dSWVI < 0,35$) и сильная ($dSWVI \geq 0,35$). Для каждой из указанных категорий мы рассчитали послепожарную динамику изменения индекса SWVI для разных типов леса (рис. 4). Динамика рассчитывалась за шестилетний период начиная со следующего после пожара года.

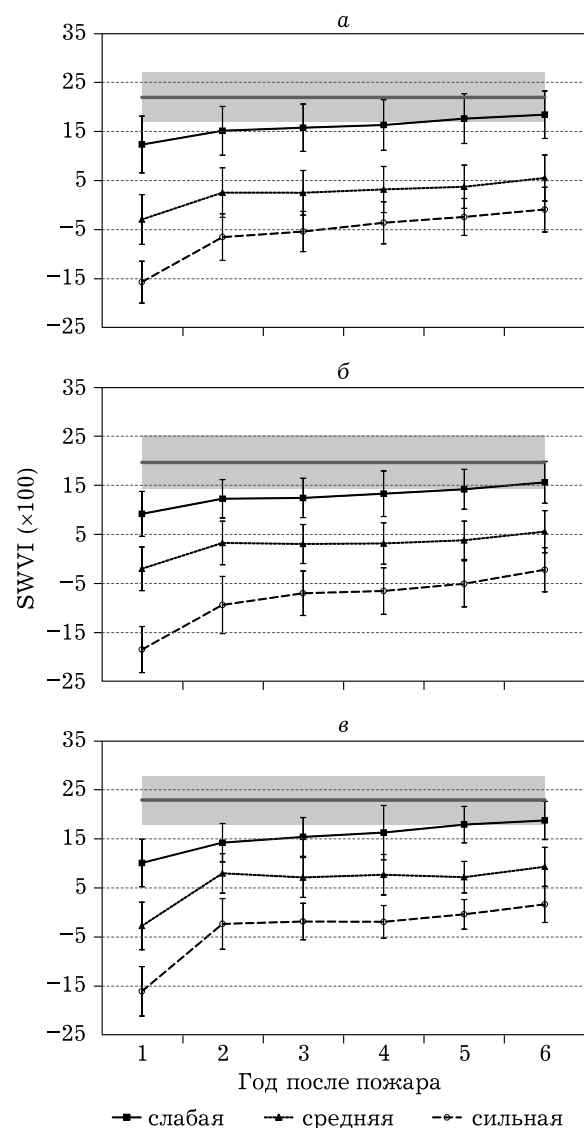


Рис. 4. Послепожарная динамика изменения индекса SWVI при различной степени нарушенности: а – сосновые леса; б – лиственные леса; в – лиственные леса. Планки погрешностей соответствуют одному стандартному отклонению. Серым цветом показано среднее значение и стандартное отклонение индекса SWVI для ненарушенных пожарами участков в течение рассматриваемого периода

Категория сильной нарушенности характеризовалась наименьшими послепожарными значениями SWVI для всех типов растительности. Для данной категории величина индекса в год, следующий за пожаром, незначительно различалась в разных типах леса и составляла в среднем около $-0,17 \pm 0,04$. Для категории земель со слабой степенью нарушенности величина индекса SWVI после пожара также имела близкие значения для разных пород и составляла около $0,11 \pm 0,05$.

Во всех рассмотренных типах растительности на участках со средней и сильной нарушенностью наибольшая скорость роста индекса после пожара отмечалась в первые два года после пирогенного воздействия, что может быть связано с разрастанием травяного покрова. Кроме того, можно отметить некоторое ускорение роста индекса SWVI на 5–6 год после пожара, вызванное, вероятно, регистрацией спутниками подростшего послепожарного возобновления. Для категории слабой нарушенности существенных вариаций скорости роста индекса не наблюдалось.

На фоновых, не нарушенных пожарами участках в разных типах насаждений значения вегетационного индекса SWVI различались слабо и составляли от $0,20 \pm 0,06$ до $0,23 \pm 0,05$ для лиственных лесов и для насаждений с преобладанием лиственницы соответственно (см. рис. 4). Большая часть пожаров на рассмотренной территории регистрировалась в лиственных насаждениях, которые, согласно литературным данным и результатам наших исследований, в южнотажной и лесостепной зонах являются устойчивыми к воздействию лесных пожаров [Буряк и др., 2003; Wirth, 2005; Буряк, 2015]. Также лиственные леса обычно характеризуются быстрым послепожарным лесовозобновлением [Мелехов, 1947].

За рассмотренный нами 6-летний период вегетационные индексы на нарушенных участках не достигли фоновых значений, что связано с длительным периодом восстановления лесов. Для участков со слабой степенью нарушенности итоговые значения индексов находились в диапазоне 92–96 % по отношению к незатронутым пожарами лесным землям, в то же время для сильно нарушен-

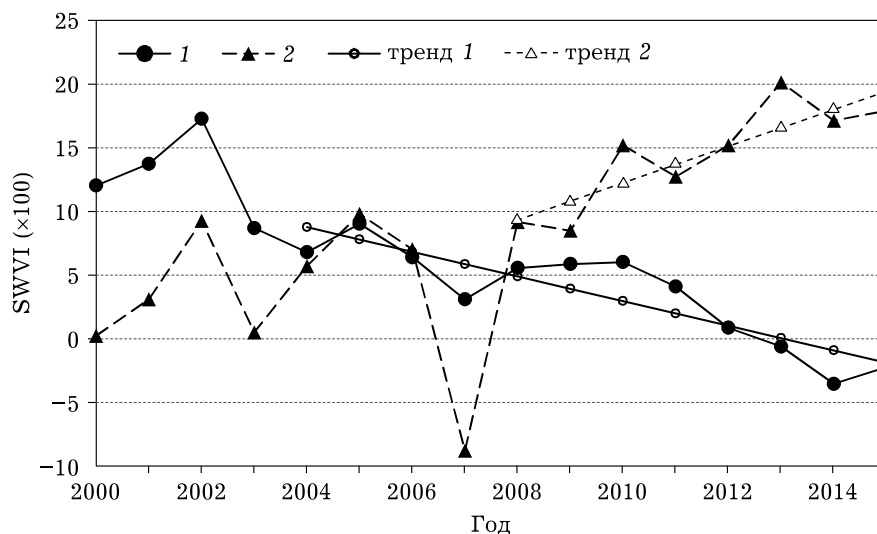


Рис. 5. Динамика вегетационного индекса SWVI для двух участков: 1 – насаждение, погибшее после пожара 2003 г., где по данным наземных обследований лесовозобновление отсутствует; 2 – насаждение, погибшее после пожара 2007 г., с успешным возобновлением березы и осины. Для каждого из участков показаны соответствующие линии тренда

ных участков это отношение составило 77–82 %.

В качестве характеристики успешности восстановления растительности после пожара мы использовали угловые коэффициенты линейного тренда, описывающего динамику изменения индекса SWVI после сезона, в котором был зарегистрирован пожар.

На рис. 5 приведен пример динамики лесовозобновления для двух участков, на одном из которых, согласно данным наземных исследований, лесовозобновление отсутствует, а на другом наблюдается успешное естественное возобновление. Угловые коэффициенты линий тренда, характеризующие послепожарную динамику растительности, существенно отличаются.

Около 75 % всех поврежденных пожарами пикселей характеризовались слабыми возрастающими трендами (значения угловых коэффициентов от 0,5 до 1,5). Отрицательные угловые коэффициенты, соответствующие последовательному снижению индекса SWVI после пожара, наблюдались для 5 % нарушенных площадей. Существенный рост вегетационного индекса (коэффициент более 2) наблюдался в 17 % случаев.

Мы проанализировали средние значения угловых коэффициентов линий тренда в зависимости от количества сезонов, когда в

пикселе регистрировались пожары. Несмотря за значительную вариацию угловых коэффициентов в пределах каждой категории, наблюдалось снижение их средних значений при увеличении числа пожаров (рис. 6), что указывает на затруднение процесса восстановления растительности на участках, многократно подвергавшихся воздействию пожаров. Так, для участков, однократно пройденных огнем, среднее значение коэффициента составило $1,13 \pm 0,44$, а для участков, где пожары регистрировались пять и более раз за период с 2000 по 2009 г. – $0,26 \pm 0,25$.

Анализ данных, полученных в ходе наземных исследований, а также использова-

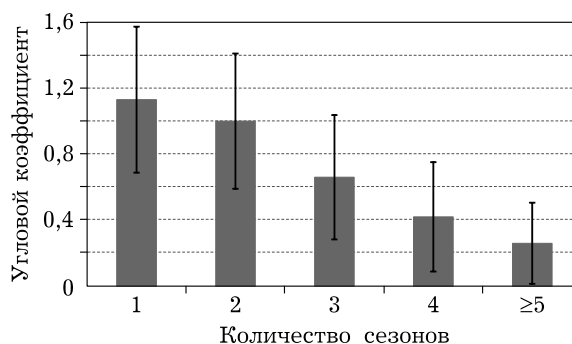


Рис. 6. Средние значения угловых коэффициентов линий тренда в зависимости от количества пожаров за 2000–2009 гг. Планки погрешностей соответствуют одному стандартному отклонению

ние спутниковых снимков высокого пространственного разрешения (сервис Google Earth) позволили получить набор критериев для оценки успешности постпирогенного восстановления растительности по спутниковым снимкам низкого пространственного разрешения, основанных на анализе временных рядов индекса SWVI. Основными используемыми критериями являлись угловые коэффициенты линий тренда вегетационного индекса SWVI, а также отношение значений индекса SWVI после пожара к допожарным значениям.

В качестве первого критерия наличия успешного лесовозобновления использовалось условие $k_{swvi} \geq 1,4$, где k_{swvi} – угловой коэффициент линии тренда индекса SWVI после пожара. В то же время ряд поврежденных пожарами участков, особенно со слабой и средней степенью нарушенности (значения dSWVI менее 0,35), характеризовался меньшими значениями угловых коэффициентов, для которых предыдущее условие не выполнялось. Для таких участков дополнительно анализировались до- и послепожарные значения индекса, а условие отнесения пикселей к данной категории было следующим: $0,5 < k_{swvi} < 1,4$ и $SWVI_{post} \geq SWVI_{pre} - \sigma_{SWVI}$, где $SWVI_{pre}$ и $SWVI_{post}$ – до- и послепожарные значения индекса, σ_{SWVI} – стандартное отклонение индекса до пожара. Значение $SWVI_{pre}$ рассчитывалось как среднее значение индекса в сезоны перед пожаром, а значение $SWVI_{post}$ – как среднее значение индекса за три последних года рассматриваемого периода, т. е. 2013–2015 гг. Данный критерий проверяет наличие возрастающего тренда и близость значения индекса в конце рассматриваемого периода к его допожарному значению.

Критерием определения областей, где процессы лесовозобновления затруднены, являлись отрицательные значения угловых коэффициентов, указывающие на последовательное снижение вегетационного индекса после пожара ($k_{swvi} < -0,1$). Кроме того, областями с отсутствующим или недостаточным возобновлением считались те районы, где не наблюдалось роста индекса после снижения, вызванного пожаром, т. е. использовались следующие условия: $-0,1 \leq k_{swvi} \leq 0,5$

и $SWVI_{post} < SWVI_{pre} - \sigma_{SWVI}$. Также в отдельную категорию выделялись области, которые характеризовались незначительным изменением SWVI, но при этом сами значения индекса отличались от фоновых не более чем на величину одного стандартного отклонения: $-0,1 \leq k_{swvi} \leq 0,5$ и $SWVI_{post} \geq SWVI_{pre} - \sigma_{SWVI}$. Такие области рассматривались как слаборазрушенные.

С помощью этих критериев на территории юго-западной части Забайкальского края выделены участки лесных земель с успешным лесовозобновлением и территории, где лесовозобновление затруднено (рис. 7).

Площадь участков лесных земель, на которых после пожаров регистрировалось успешное возобновление, составила около 1330 тыс. га (15 % общей площади лесных земель), где лесовозобновление затруднено – более 960 тыс. га (11 % площади лесных земель), а территории, где с помощью рассмотренных критериев не удалось сделать вывод о послепожарном состоянии лесов, – около 70 тыс. га (менее 1 % площади лесных земель). Мы сравнили полученные нами данные с картой гибели лесов по данным спутника Landsat за период 2000–2012 гг. [Hansen et al., 2013]. Согласно продукту, полученному М. С. Хансеном с соавт., площадь, на которой наблюдалась гибель древостоев, в рассматриваемом регионе составила более 700 тыс. га, что примерно на 20 % меньше, чем полученные нами результаты. Таким образом, можно отметить, что несмотря на различия в данных и методах их обработки, продукты дают сопоставимые результаты.

Около 68 % от площади лесных земель, где отмечалось затруднение послепожарного возобновления, приходится на преобладающие в регионе лиственные леса, более 20 % – на сосновые насаждения, около 10 % – на лиственные леса. Соотношение по преобладающим породам для участков лесных земель, на которых наблюдается успешное возобновление, оказалось аналогичным. Примерно на 25 % площади лиственных насаждений, которые пройдены огнем в период с 2000 по 2009 г., наблюдалось затруднение процесса лесовозобновления, в то время как для сосновых насаждений эта величина составила около 37 %.

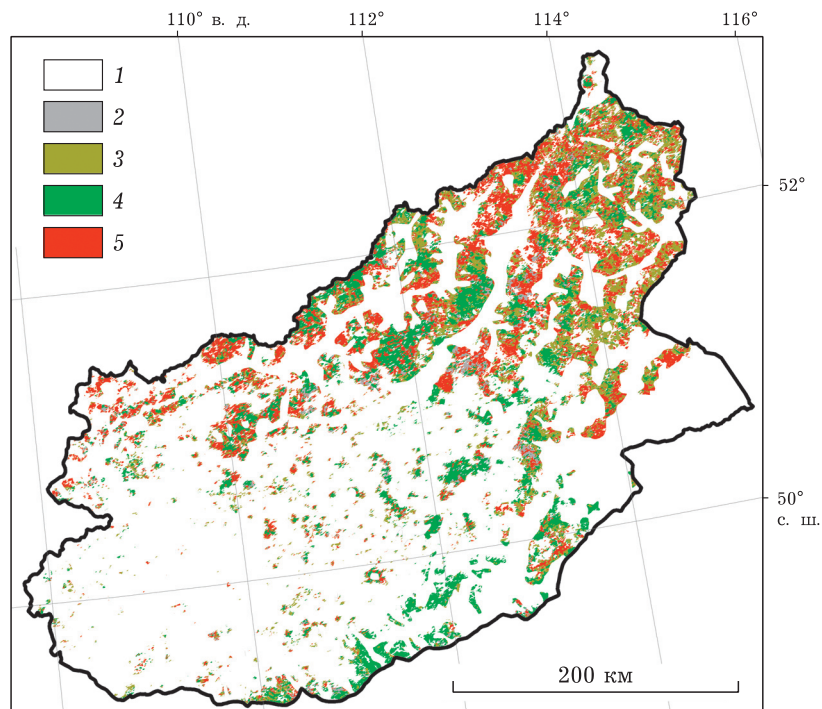


Рис. 7. Оценка успешности лесовозобновления после пожаров 2000–2009 гг. в юго-западной части Забайкальского края.

1 – нелесные и негоревшие (согласно продукту MOD14A1/ MYD14A1) территории; 2 – территории, для которых не выполнялись критерии оценки состояния возобновления; 3 – слабонарушенные территории; 4 – территории с успешным лесовозобновлением; 5 – территории с недостаточным лесовозобновлением или его отсутствием

Существенные различия между категориями успешности лесовозобновления выявлены при анализе повторяемости пожаров. Так, на участках лесных земель, где наблюдалось успешное возобновление, за рассмотренный период пожары регистрировались однократно на 70 % площади, двукратно – на 22 %. На участках лесных земель, где отмечалось отсутствие или затруднение лесовозобновления, пожары фиксировались однократно только на 30 % площади, двукратно – на 35 %, существенная доля площади (более 30 %) пройдена огнем три раза и более.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Инструментально, с использованием архивных спутниковых данных, проведена оценка успешности лесовозобновления на нарушенных пожарами участках лесных земель в юго-западных районах Забайкальского края. В качестве основного индикатора степени нарушения лесов принят коротковолновый вегетационный индекс SWVI, в котором

используются измерения отраженного излучения в ближнем и среднем ИК диапазонах спектра.

Анализ сезонной динамики активных пожаров и разностных вегетационных индексов указывает на более существенное повреждение растительности пожарами, действующими в летнее время. В то же время основная доля пройденной огнем площади приходится на весенние пожары.

Анализ динамики вегетационных индексов показал, что за шестилетний период после пожара их значения на нарушенных участках лесных земель не достигли фоновых величин. При этом на участках со слабой степенью пирогенного воздействия итоговые значения индексов находились в диапазоне 92–96 % от фоновых значений, регистрируемых в не затронутых пожарами насаждениях, а для сильно нарушенных участков это отношение составило 77–82 %.

Тренд изменения индекса SWVI после пожара использовался для оценки лесовозобновления. Выделены территории с успешным

постпирогенным возобновлением, а также участки лесных земель, где возобновление отсутствовало или оказалось затруднено. При этом площадь лесных земель, на которых лесовозобновление затруднено, составила в регионе исследования около 900 тыс. га.

На значительной площади изученных районов Забайкальского края в течение 2000–2015 гг. регистрировались повторные пожары. Анализ динамики вегетационных индексов показал, что повторные пожары (с периодичностью два раза и более за рассматриваемый 10-летний период) негативно влияют на лесовозобновительный процесс.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований (проект № 15-04-06567А). Спутниковые данные получены в рамках реализации проекта Российского научного фонда № 14-24-00112.

ЛИТЕРАТУРА

- Анучин Н. П. Лесная таксация. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 552 с.
- 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 // Совр. проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7, № 3. С. 215–225.
- 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.
- Бузыкин А. И., Побединский А. В. К вопросу учета подроста и самосева // Тр. ИЛИД СО АН СССР. 1963. Т. 57. С. 185–191.
- Буряк Л. В., Лузганов А. Г., Матвеев П. М., Каленская О. П. Влияние низовых пожаров на формирование светлехвойных насаждений юга Средней Сибири. Красноярск: СибГТУ, 2003. 195 с.
- Буряк Л. В., Сухинин А. И., Каленская О. П., Пономарев Е. И. Последствия пожаров в ленточных борах юга Сибири // Сиб. экол. журн. 2011. № 3. С. 331–339 [Buryak L. V., Kalenskaya O. P., Sukhinin A. I., Ponomarev E. I. Effects of fires in ribbon-like pine forests of southern Siberia // Contemporary Problems Ecol. 2011. Vol. 4, N 3. P. 248–253].
- Буряк Л. В. Лесообразовательный процесс в нарушенных пожарами светлехвойных насаждениях юга Сибири: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Красноярск, 2015. 37 с.
- Дейвис Ш. М., Ландгребе Д. А., Ланженлауб Д. С., Сивева Ле Р. Ф., Свейн Ф. Х., Филлипс Т. Л., Хоффер Р. М. Дистанционное зондирование: количественный подход / под ред. Ф. Свейна, Ш. Дейвис; пер. с англ. М.: Недра, 1983. 415 с.
- Егоров В. А., Барталев С. А., Лупян Е. А., Уваров И. А. Мониторинг повреждений растительного покрова пожарами по данным спутниковых наблюдений // Изв. вузов: геодезия и аэрофотосъемка. 2006. Вып. 2. С. 98–109.
- Кулаков В. С. География Забайкальского края: учеб. пособие. Чита: Экспресс изд-во, 2009.
- Курбатский Н. П. Классификация лесных пожаров // Вопр. лесоведения. Красноярск: ИЛИД, 1970. С. 384–407.
- Курганович К. А., Макаров В. П. Использование вегетационных индексов NDVI для оценки влияния пожаров на динамику растительности Цасучейского бора // Вестн. Забайк. гос. ун-та. 2015. № 2 (117). С. 27–36.
- Мелехов И. С. Природа леса и лесные пожары. Архангельск: ОГИЗ, 1947. 44 с.
- Пономарев Е. И., Швецов Е. Г. Характеристики категорий пожаров растительности в Сибири по данным спутниковых и других наблюдений // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 5. С. 45–54.
- Растительность СССР (для высших учебных заведений): карта м-ба 1 : 4 000 000. М.: ГУТК, 1990.
- Советский Союз. Географическое описание: в 22 т. Восточная Сибирь / под ред. С. В. Калесник. М.: Мысль, 1969. 494 с.
- Сукачев В. Н., Зонн С. В. Методические указания по изучению типов леса. М.: АН СССР, 1961. 144 с.
- Фурьев В. В. Роль пожаров в процессе лесообразования. Новосибирск: Наука, 1996. 251 с.
- Швиденко А. З., Щепашенко Д. Г., Ваганов Е. А., Сухинин А. И., Максюттов Ш. Ш., МкКаллум И., Лакида И. П. Влияние природных пожаров в России 1998–2010 гг. на экосистемы и глобальный углеродный бюджет // ДАН. 2011. Т. 411, № 4. С. 544–548.
- Швиденко А. З., Щепашенко Д. Г. Климатические изменения и лесные пожары в России // Лесоведение. 2013. № 5. С. 50–61.
- Энциклопедия Забайкалья / гл. ред. Р. Ф. Гениатулин. Новосибирск: Наука, 2000. 302 с.
- Barrett K., Kasischke E. S., McGuire A. D., Turetsky M. R., Kane E. S. Modeling fire severity in black spruce stands in the Alaskan boreal forest using spectral and non-spectral geospatial data // Remote Sens. Environ. 2010. Vol. 114, N 7. P. 1494–1503.
- Barrett K., McGuire A. D., Hoy E. E., Kasischke E. S. Potential shifts in dominant forest cover in interior Alaska driven by variations in fire severity // Ecol. Appl. 2011. Vol. 21. P. 2380–2396.
- Fiorella M., Ripple W. Analysis of conifer forest regeneration using Landsat Thematic Mapper data // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1993. Vol. 59. P. 1383–1388.
- Gao B. NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sens. Environ. 1996. Vol. 58. P. 257–266.
- Giglio L. MODIS Collection 5 Active Fire Product User's Guide (Version 2.5, 31 March 2013), 2013.
- Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., Turubanova S. A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S. V., Goetz S. J., Loveland T. R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C. O., Townshend J. R. G. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. Science. 2013. Vol. 342 (15 November). P. 850–853.

- Hunt E. R. Jr., Rock B. R. Detection of changes in leaf water content using near- and middle-infrared reflectances // *Remote Sens. Environ.* 1989. Vol. 30. P. 43–54.
- Jin Y., Randerson J. T., Goetz S. J., Beck P. S. A., Loran-ty M. M., Goulden M. L. The influence of burn severity on postfire vegetation recovery and albedo change during early succession in North American boreal forests // *J. Geophys. Res.* 2012. Vol. 117. G01036, doi: 10.1029/2011JG001886.
- Krylov A., McCarty J. L., Potapov P., Loboda T., Tyukavina A., Turubanova S., Hansen M. C. Remote sensing estimates of stand replacement fires in Russia, 2002–2011 // *Environ. Res. Lett.* 2014. Vol. 9.
- Kukavskaya E. A., Buryak L. V., Ivanova G. A., Conard S. G., Kalenskaya O. P., Zhila S. V., McRae D. J. Influence of logging on the effects of wildfire in Siberia // *Environ. Res. Lett.* 2013. Vol. 8.
- Malevsky-Malevich S. P., Molkentin E. K., Nadyozhina E., Shklyarevich O. B. An assessment of potential change in wildfire activity in the Russian boreal forest zone induced by climate warming during the twenty-first century // *Climatic Change*. 2008. Vol. 86, N 3. P. 463–474.
- 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 Sens. Environ.* 2007. Vol. 109. P. 66–80.
- Mitri G., Gitas I. Mapping post-fire vegetation regeneration using EO-1 Hyperion // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2010. Vol. 48, N 3. P. 457–462.
- Schaaf C. B., Feng G., Strahler A. H., Lucht W. et al. First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS. // *Remote Sens. Environ.* 2002. Vol. 83, N 1-2. P. 135–148.
- Tucker C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // *Ibid.* 1979. Vol. 8. P. 127–150.
- Wirth C. Fire regime and tree diversity in boreal forests: implications for the carbon cycle // *Forest Diversity and Function SE-15 Ecological Studies* / eds. M. Scherrer-Lorenzen, C. Kömer, E.-D. Schulze. Berlin: Springer, 2005. Vol. 176. P. 309–344.

Satellite Monitoring of Forest Vegetation State After the Fire Impacts in the Zabaikal Krai

E. G. SHVETSOV¹, E. A. KUKAVSKAYA¹, L. V. BURYAK²

¹ *V. N. Sukachev Institute of Forest, SB RAS
660036, Krasnoyarsk, Akademgorogok, 50/28*

² *Siberian State Technological University
660049, Krasnoyarsk, Mira ave., 82
E-mail: eugeneshvetsov11@yandex.ru*

In the presented paper we used MODIS data to estimate disturbance of forest covered lands in the south-western areas of the Zabaikal Krai caused by fires. Joint analysis of vegetative indices calculated by measurements of the reflected radiation in the near and mid-infrared wave range and data of the on-ground studies allowed to identify areas of successful and poor reforestation on the fire disturbed territories. Based on instrumental data it was found that repeated fires prevented successful reforestation. The analysis of seasonal dynamics indicates that summer fires result in greater damages of forest vegetation as compared to spring fires. Larch stands prevailing in the region account for a major proportion of the fire disturbed lands (including the largest area where the reforestation processes are hampered) while the pine and deciduous stands are characterized by a higher frequency of fires.

Keywords: remote sensing, forest fires, vegetation indices, reforestation.