

<https://doi.org/10.25686/10.25686.2022.19.64.003>

УДК 630:528.8

ОЦЕНКИ НАРУШЕННОСТИ ЛЕСОВ В ЮЖНЫХ РАЙОНАХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ СИБИРИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ

Е.Г. Швецов ^{1,2}

¹ Федеральный исследовательский центр Красноярского научного центра СО РАН,
Красноярск, Россия

² Хакасский государственный университет, Абакан, Россия

*Природные пожары являются одним из основных факторов нарушения лесов, влияющих на их динамику, сукцессию и баланс углерода во многих регионах Сибири. В данной работе представлены результаты анализа пирогенных нарушений, наблюдавшихся в лесах южных районов Центральной Сибири в период с 2001 по 2021 год. Для анализа пирогенной нарушения территории были использованы данные MODIS и продукт глобального изменения лесов, основанный на использовании данных Landsat. В период с 2001 по 2021 год огнем было пройдено около 1,42 % от общей площади лесов, при этом наибольший показатель в 3,6 % пришелся на лиственные леса. В наименьшей степени (0,4 %) нарушения отмечались в темнохвойных лесах, представленных в основном кедром (*Pinus sibirica*) и пихтой (*Abies sibirica*). В то же время в темнохвойных лесах наблюдался наибольший послепожарный отпад древостоя. Практически полная потеря лесного покрова наблюдалась более чем на 50 % площади, пройденной огнем, в темнохвойных насаждениях. Статистически значимые ($p < 0,05$) различия между степенью пирогенной нарушения лесов, которая оценивалась с помощью индекса dNBR, и соответствующим коэффициентом гибели древостоев наблюдались для всех преобладающих лесообразующих пород в пределах исследуемого региона. Так, пожарные пиксели MODIS, которые характеризовались значениями dNBR выше 0,44, процент послепожарного отпада древостоя был на 40–50 % выше по сравнению с пикселями, в которых dNBR был меньше 0,44.*

Ключевые слова: ДЗЗ, MODIS, Landsat, лесные пожары, сосна, dNBR.

ASSESSMENTS OF FOREST DISTURBANCE IN CENTRAL SIBERIA'S SOUTHERN REGIONS ACCORDING TO SATELLITE IMAGERY

E.G. Shvetsov ^{1,2}

¹ Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of RAS”,
Krasnoyarsk, Russia

² Khakassian State University, Abakan, Russia

*In many areas of Siberia, wildfires are one of the primary causes of forest disturbance, impacting the dynamics, succession, and carbon balance of the forest. The study of pyrogenic disturbances observed in the forests of Central Siberia's southern regions over the period of 2001 and 2021 is presented in this paper. Data from MODIS and a product of global forest change based on the usage of Landsat data were used to analyze the pyrogenic disturbance of the area. Between 2001 and 2021, there was fire in nearly 1.42 % of the entire forest area, with larch forests having the highest percentage (3.6). Dark coniferous forests, primarily made up of Siberian pine (*Pinus sibirica*) and Siberian fir (*Abies sibirica*), had the fewest disturbances (0.4 %), according to the study. At the same time, dark coniferous forests were discovered to have the highest post-fire mortality of any forest stand. More than 50 % of the area burned by the fire in dark coniferous plantations showed almost complete loss of forest cover. All of the primary forest-forming species in the area under study*

showed statistically significant ($p < 0.05$) differences between the level of pyrogenic disturbance of forests, which was measured using the dNBR index, and the associated stand death rate. As a result, compared to pixels where the dNBR value was less than 0.44, the proportion of post-fire fallout of the stand was 40–50 % greater in MODIS fire pixels.

Keywords: *Earth remote sensing, MODIS, Landsat, forest fires, Scotch pine, dNBR.*

Введение

Спутниковый мониторинг служит важным источником информации о состоянии, динамике и функционировании природных комплексов. Одной из основных задач спутникового мониторинга является оценка изменений в лесах, вызванных такими факторами, как рубки, лесные пожары, повреждения энтомо вредителями. Последние работы, основанные на использовании данных дистанционного зондирования, позволяют проводить картографирование растительности, оценивать гибель древостоев и их восстановление (Барталев и др., 2015; Krylov et al., 2014), анализировать и прогнозировать динамику таких факторов, как вспышки насекомых-вредителей (Kharuk, Antamoshkina, 2017), рубки и пожары (Shvetsov et al., 2021) и их влияние на лесные насаждения. Спутниковые системы низкого и среднего пространственного разрешения, такие как MODIS и Landsat, активно используются для мониторинга лесов, формирования тематических глобальных продуктов, содержащих информацию о состоянии растительного покрова и т.д. (Hansen et al., 2013; Барталев и др., 2016).

Одним из основных факторов нарушенности, влияющих на динамику растительности, биоразнообразие и цикл углерода в бореальных лесах России, являются лесные пожары (Барталев и др., 2015; Leskinen et al., 2020). В России ежегодно воздействию пожаров подвергается несколько миллионов гектаров лесов, в основном на территории Сибири. Площадь пожаров по России может сильно меняться в разные годы в зависимости от погодных условий, при этом среднегодовая площадь пожаров в лесах составляет 5–7 млн га (Барталев и др., 2015). В частности, в последние десятилетия наблюдается рост площади пожаров в лесах южной и центральной Сибири (Kukavskaya et al., 2016; Shvetsov et al., 2017).

Спутниковые данные широко используются для оценки степени нарушенности лесов пожарами в бореальной зоне (French et al., 2008; Барталев и др., 2010; Chu et al., 2017). В частности, использование комбинации спектральных коэффициентов отражения в ближнем и коротковолновом инфракрасном диапазоне спектра обеспечивает наилучшее различие между участками, пройденными огнем, и ненарушенными территориями, а также дает информацию о степени пирогенной нарушенности растительности (Key, Benson, 2005). Эти спектральные диапазоны были использованы при формировании нормализованного индекса гарей (NBR), который представляет собой разность между двумя спектральными каналами, отнесенную к их сумме. Было показано, что дельта NBR, рассчитанная путем вычитания значения NBR, полученного после воздействия пожара, из значения NBR, полученного до пожара, связана со степенью нарушенности растительности, вызванной пожаром (Sorbel, Allen, 2005; Cocke et al., 2005). Оценки степени нарушенности и послепожарной гибели древостоя можно рассматривать как важные факторы, необходимые для лучшего понимания влияния лесных пожаров на лесные экосистемы. Например, пожары в сосновых лесах юга Сибири обычно не приводят к значительной гибели деревьев (Ivanova, Ivanov, 2005), тогда как пожары в темнохвойных насаждениях приводят к полной гибели деревьев (Furyaev, 1996). Таким

образом, оценка региональных особенностей степени нарушенности лесов пожарами и связанной с этим гибелью деревьев остается актуальной задачей.

Целью данной работы являлась оценка пирогенной нарушенности лесов в южных районах центральной Сибири с 2001 по 2021 год, что включало решение следующих задач:

- 1) оценить долю площади, пройденной огнем, в основных преобладающих древостоях региона;
- 2) оценить долю площади, пройденной огнем, с различной величиной послепожарной гибели древостоев;
- 3) провести анализ влияния степени пирогенной нарушенности растительности, оцениваемой с помощью индекса dNBR, на величину отпада древостоя.

Район исследования

Район исследований охватывает южные районы Красноярского края, а также территорию республик Хакасия и Тыва между 50–56° с.ш. и 88–99° в.д. Площадь района исследований составила около $4,1 \times 10^5$ км² (рис. 1). Согласно карте растительности, разработанной в Институте космических исследований РАН и доступной на сайте <http://pro-vega.ru/maps/>, доминирующими древесными породами являются темнохвойные леса, представленные в основном кедром (*Pinus sibirica*) и пихтой (*Abies sibirica*) (25 % площади района исследований) с меньшей долей лиственницы (*Larix sibirica*) (16 %) и сосны (*Pinus sylvestris*) (5 %). Заметную часть лесной площади (12 %) занимают смешанные леса с преобладанием лиственных пород (*Betula spp.*, *Populus tremula*) (Барталев и др., 2016).

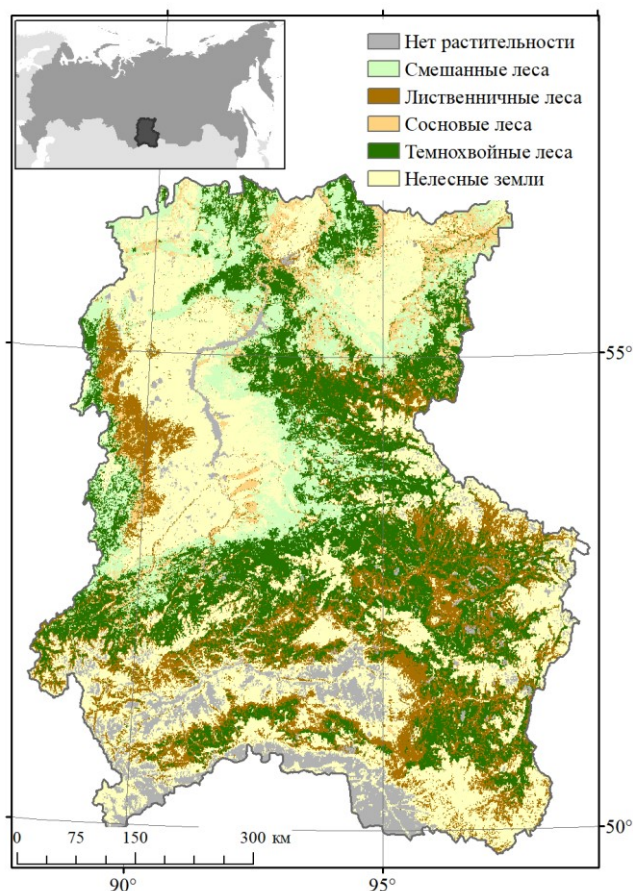


Рис. 1. Район исследования. Типы растительности согласно карте, разработанной в ИКИ РАН, показаны различными цветами

Материалы и методы исследования

Спутниковые данные

Для обнаружения участков, пройденных огнем, и оценки степени пирогенной нарушенности растительности использовались тематические продукты, полученные на основе данных MODIS за 2001–2021 годы. Так, картирование пройденных огнем участков выполнялось с использованием продукта площадей гарей MODIS (MCD64A1) с пространственным разрешением 500 м (Giglio et al., 2018). Продукт отражательной способности поверхности (MOD09A1) с пространственным разрешением 500 м (Vermote, 2015) использовался для оценки степени пирогенной нарушенности растительности. Данные MODIS загружались с использованием сервиса LAADS (Level-1 and Atmosphere Archive & Distribution System, <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>).

Преобладающие породы древостоев на территории района исследования определялись с помощью карты, разработанной в ИКИ РАН и доступной через сервис VEGA (<http://pro-vega.ru/maps/>) (Барталев и др., 2016). Глобальный продукт изменения лесов, сформированный по данным Landsat (Hansen et al., 2013) версии 1.9 был использован для выделения участков, на которых имела место послепожарная гибель древостоев. Этот продукт основан на данных спутников Landsat 7 и Landsat 8 data, имеет пространственное разрешение около 30 м и содержит набор растровых слоев, отмечающих положение и дату гибели лесного покрова между 2001 и 2021 годами. Этот продукт свободно доступен по адресу <https://storage.googleapis.com/earthenginepartners-hansen/GFC-2021-v1.9/download.html>.

Методы исследования

Обработка данных включала оценку степени пирогенной нарушенности лесов в каждом пожарной пикселе, а также расчет доли пикселя, на которой имела место послепожарная гибель древостоя.

Дельта нормализованных индексов гарей (dNBR), рассчитанная с помощью продукта отражательной способности поверхности, сформированного по данным MODIS, использовалась для оценки степени пирогенной нарушенности растительности (French et al., 2008; Key, Benson, 2005). Этот индекс рассчитывался как разница между допожарным и послепожарным значениями нормализованного индекса гарей (NBR), как показано в уравнении (2). Для расчета нормализованного индекса гарей по данным MODIS использовался канал band 2 (0,841–0,876 мкм) и канал 7 (2,105–2,155 мкм):

$$NBR = (R2 - R7) / (R2 + R7) \quad (1)$$

$$dNBR = NBR_{prefire} - NBR_{postfire}, \quad (2)$$

где R2 и R7 обозначают значения отражательной способности в каналах 2 и 7 MODIS, соответственно; $NBR_{prefire}$ соответствует значению NBR, измеренному в год перед пожаром, а $NBR_{postfire}$ соответствует величине NBR, измеренной на следующий год после пожара.

Места и даты пирогенных нарушенностей лесов определялись с помощью продукта гарей MODIS. Для каждого года с 2001 по 2021 были сформированы ГИС слои пирогенно нарушенных участков, что в результате дало 21 растровый слой гарей. В данной работе рассматривались только пожары, действовавшие на лесных землях, а пожары на нелесных землях (степи, сельскохозяйственные земли) исключались из анализа.

С помощью глобального продукта изменения лесов (Hansen et al., 2013) для каждого пожарного пикселя MODIS была рассчитана доля его площади, на которой имела место

послепожарная гибель древостоя. Данный показатель был рассчитан как отношение количества пикселей продукта изменения лесов, где произошла гибель древостоя, к общему количеству пикселей этого продукта в пределах одного пикселя продукта гарей MODIS. Поскольку вызванная пожаром гибель древостоя может происходить в течение нескольких лет после пирогенного воздействия, был использован порог в 3 года, согласно подходу, который применялся ранее для выявления нарушений, вызванных лесными пожарами (Krylov et al., 2014).

Таким образом, для каждого пожарного пикселя MODIS было рассчитано значение dNBR, а также доля лесной площади, на которой имел место отпад древостоя. Исходя из доли послепожарного отпада пожарные пиксели делились на четыре класса: 0 – 25 %, 26 – 50 %, 51 – 75 % и 76 – 100 %.

Результаты и обсуждение

Ежегодные площади, пройденные огнем, в регионе в период с 2001 по 2021 год существенно варьировались от 2 до 93 тысяч гектаров в зависимости от погодных условий. Среднегодовая площадь пожаров составила $19,6 \pm 18,7$ тыс. га (среднее значение $\pm$ стандартное отклонение). Статистически значимого тренда площади пожаров за рассмотренный период не наблюдалось.

Наибольшая степень нарушенности (3,6 %), рассчитанная как отношение общей площади, пройденной огнем, к общей площади лесов данного типа преобладающих древостоев, наблюдалась в лиственных лесах, т. е. 3,6 % лиственных лесов пострадали от пожаров в период с 2001 по 2021 год. Наименьшая (0,4 %) оказалась в темнохвойных насаждениях (табл. 1).

Таблица 1

Величина пирогенной нарушенности для основных преобладающих пород

Преобладающая порода	Площадь пожаров как доля от общей площади лесов, %	Доля различных классов послепожарного отпада древостоя в площади пожаров, %			
		0 – 25	26 – 50	51 – 75	76 – 100
Лиственница	3,6	64,1	10,4	11,8	13,7
Смешанные	1,0	99,6	0,3	0,0	0,1
Сосна	0,5	61,7	7,0	8,6	22,7
Темнохвойные	0,4	13,8	12,4	21,0	52,8

Анализ послепожарного отпада показал, что наиболее высоким его уровень был в темнохвойных древостоях. Например, в более 50 % пожарных пикселей произошла гибель древостоя более чем на 75 % их площади (табл.1). В целом это согласуется с предыдущими выводами о наибольшей доле пожаров, приводящих к смене породного состава, происходящих в таких лесах (Krylov et al., 2014; Furgayev, 1996). В то же время смешанные леса с преобладанием лиственных пород характеризуются наименьшей величиной отпада древостоя. В более чем 99 % таких древостоев наблюдается отпад менее чем на 25 % площади пикселя MODIS (табл. 1). Результаты геопространственного анализа показали, что большинство пожаров в смешанных лесах происходило вблизи границы с нелесными землями весной (апрель и май). Так что, вероятно, эти пожары в основном были представлены малоинтенсивными весенними пожарами. Подобные ситуации, когда огонь распространялся с нелесных территорий в прилегающие лесные массивы, описывались и ранее (Kukavskaya et al., 2016; Shvetsov et al., 2021). Среднегодовая доля пожаров, приведшая к гибели древостоев на 50 % площади пожарного пикселя и более, наблюдалась примерно на 0,08 % площади

исследований, что оказалось ниже результатов Фурьева (Furyaev, 1996), полученных на основании видового состава и возрастной структуры лесов.

Регрессионный анализ показал наличие статистически значимой линейной зависимости между степенью пирогенной нарушенности растительности, оцениваемой с помощью индекса dNBR, и долей площади пикселя, где наблюдалась послепожарная гибель древостоя (рис. 2). Для разных преобладающих лесообразующих пород квадрат коэффициента корреляции варьировал от 0,78 в случае сосновых лесов до 0,91 в лесах с преобладанием лиственных пород ($p < 0,05$). Также следует отметить, что уровень отпада древостоя достигает насыщения при высоких значениях индекса dNBR ($dNBR > 0,55$) для хвойных пород.

Пирогенно нарушенные участки с dNBR более 0,44 могут быть отнесены к сильно нарушенным (Key, Benson, 2005). Для всех преобладающих типов лесообразующих пород регрессионный анализ показал статистически значимую разницу ($p < 0,05$) между dNBR и долей пожарных пикселей, на которой произошла гибель древостоя. Например, доля пикселей, где произошла гибель древостоя, варьировалась от 74 до 91 % для пожарных пикселей с dNBR выше 0,44, что на 40–50 % выше аналогичного показателя в случае пикселей с индексом dNBR менее 0,44. Ранее также отмечалось (Барталев и др., 2010), что значения вегетационного индекса, рассчитанные с использованием коротковолнового инфракрасного канала, на уровне 0,4 и выше в основном соответствуют усыхающим и мертвым насаждениям.

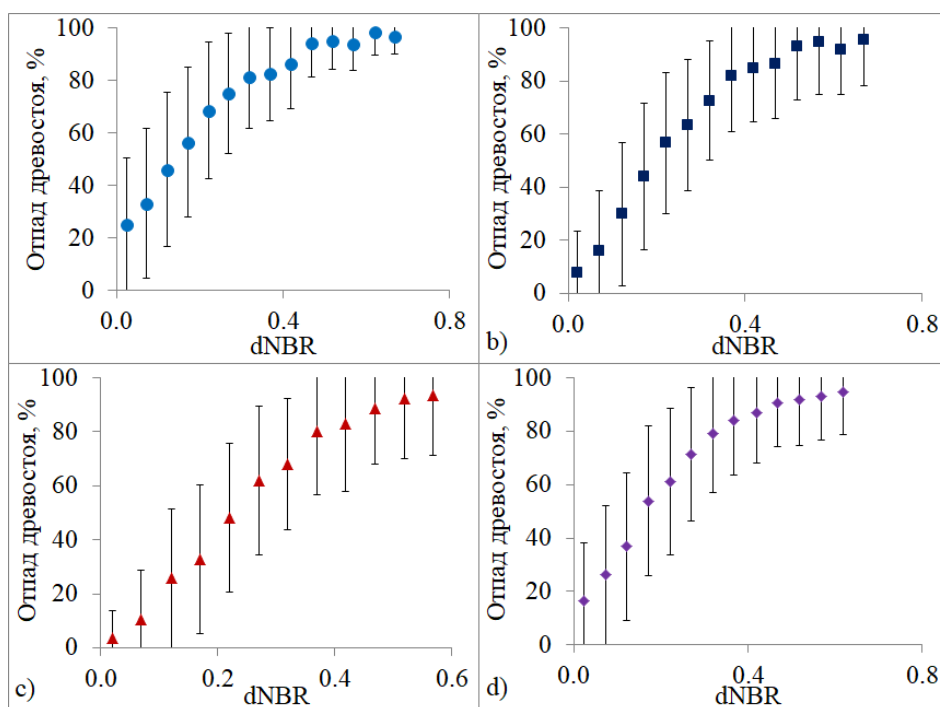


Рис. 2. Связь между величиной dNBR и уровнем отпада древостоя для преобладающих лесообразующих пород: а) темнохвойные леса, б) лиственные леса, в) смешанные леса, г) сосновые леса. Показаны средние значения для интервалов dNBR, равных 0,05. Планки погрешностей соответствуют одному стандартному отклонению

Заключение

Архивные данные MODIS по площадям, пройденным огнем, и спектральным коэффициентам отражательной способности поверхности использовались для оценки доли нарушенных огнем лесных насаждений в южных районах Центральной Сибири в период с 2001 по 2021 год. Леса с преобладанием лиственных насаждений характеризовались

наибольшей степенью нарушенности пожарами, равной 3,6 %. Степень нарушенности для смешанных лесов и насаждений с преобладанием сосны составила 1,0 и 0,5 % соответственно, а наименьшая величина 0,4 % отмечена для темнохвойных насаждений, представленных в основном кедром (*Pinus sibirica*) и пихтой (*Abies sibirica*).

Наибольший уровень гибели древостоев наблюдался в темнохвойных лесах, где почти в 74 % пожарных пикселей MODIS имел место отпад древостоя на более чем 50 % площади пикселя. Наименьший уровень отпада древостоя отмечен в смешанных лесах с преобладанием лиственных пород, где происходили в основном малоинтенсивные весенние пожары. В случае лиственных и сосновых насаждений примерно в 25–30 % пожарных пикселей происходил отпад древостоя на более чем 50 % площади пикселя. Общая среднегодовая доля пожарных пикселей, в которых имела место гибель древостоя на 50 % площади пикселя и более, составляла порядка 0,08 %.

Для всех преобладающих типов древостоев имели место статистически значимые ($p < 0.05$) различия доли пикселя, где происходила гибель древостоя, для разных уровней индекса dNBR. Например, для пожарных пикселей MODIS, где величины dNBR превышала 0,44, доля пикселей, где имела место гибель древостоя, была на 40–50% выше по сравнению с пикселями, в которых значения dNBR были менее 0,44.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда проект № 22-17-20012, <https://rscf.ru/project/22-17-20012/> при паритетной финансовой поддержке Правительства Республики Хакасия.

Библиографический список

1. 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. Москва: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
2. 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.
3. 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.
4. Chu T., Guo X., Takeda K. Effects of burn severity and environmental conditions on post-fire regeneration in Siberian larch forest // Forests. 2017. Vol. 8, № 3. (Art. № 76). <https://doi.org/10.3390/f8030076>.
5. 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. 2005. Vol. 14, № 2. P. 189–198. <https://doi.org/10.1071/WF04010>.
6. French N.H.F., Kasischke E.S., Hall R.J., Murphy K.A., Verbyla D.L., Hoy E.E., Allen J.L. Using Landsat data to assess fire and burn severity in the North American boreal forest region: An overview and summary of results // International journal of wildland fire. 2008. Vol. 17, № 4. P. 443–462. <https://doi.org/10.1071/WF08007>.
7. Furyaev V.V. Pyrological regimes and dynamics of the southern Taiga forests in Siberia. Fire in ecosystems of boreal Eurasia forestry sciences. Goldammer J.G. and Furyaev V.V. eds Dordrecht: Springer, 1996. P. 168–185.
8. Giglio L., Boschetti L., Roy D.P., Humber M.L., Justice C.O. The collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product // Remote Sensing of Environment. 2018. Vol. 217. P. 72 – 85. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.005>.
9. 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. P. 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>.
10. Ivanova G.A., Ivanov V.I. Fire regimes in Siberian forests // International forest fires news. 2005. № 32. P. 67–69. <https://gfmc.online/wp-content/uploads/11-Ivanova-1.pdf>.
11. Key C.H., Benson N. Landscape assessment: sampling and analysis methods // FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system. Lutes R.D.C., Keane J.F., et al. eds. (USDA Forest Service: Rocky Mountain Research Station), 2005.
12. Kharuk V.I., Antamoshkina O.A. Impact of silkmoth outbreak on taiga wildfires // Contemporary problems of ecology. 2017. Vol. 10, № 5. P. 556–562. <http://dx.doi.org/10.1134/S1995425517050055>.

13. Krylov A., McCarty J., Potapov P., Loboda T., Tyukavina A., Turubanova S., Hansen M. Remote sensing estimates of stand-replacement fires in Russia, 2002–2011 // *Environmental research letters*. 2014. Vol. 9, № 10, Art № 105007.
14. Kukavskaya E.A., Buryak L.V., Shvetsov E.G., Conard S.G., Kalenskaya O.P. 2016 The impact of increasing fire frequency on forest transformations in southern Siberia // *Forest ecology and management*. 2016. Vol. 382. P. 225-235. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.015>.
15. Leskinen P., Lindner M., Verkerk P.J., Nabuurs G.J., Van Brusselen J., Kulikova E., Hassegawa M., Lernik B. (eds.). Russian forests and climate change. What science can tell us 11. 2020. European Forest Institute. <https://doi.org/10.36333/wsctu11>.
16. Shvetsov E.G., Kukavskaya E., Shestakova T., Laflamme J., Rogers B.M. 2021 Increasing fire and logging disturbances in Siberian boreal forests: a case study of the Angara region // *Environmental research letters*. 2021. Vol. 16, № 11, Art. № 115007. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ac2e37>.
17. Sorbel B., Allen J. Space-based burn severity mapping in Alaska's National Parks // *Alaska Park Science*. 2005. № 4., P. 4-11. <https://www.nps.gov/articles/aps-v4-i1-c1.htm>.
18. Vermote E.F. MOD09A1 MODIS Surface Reflectance 8-Day L3 Global 500 m SIN Grid V006. 2015. NASA EOSDIS Land Processes DAAC.

References

1. Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Lupjan E.A., Plotnikov D.E., Hvostikov S.A., Shabanov N.V. Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii (Land cover mapping over Russia using Earth observation data). Moscow. Russian Academy of Sciences' Space Research Institute, 2016. 208 p.
2. Bartalev S.A., Egorov V.A., Krylov A.M., Stycken F.V., Hovratovich T.S. Issledovanie vozmozhnostej ochenki sostojanija povrezhdennyh pozharami lesov po dannym mnogospektral'nyh sputnikovyh izmerenij (The evaluation of possibilities to assess forest burn severity using multi-spectral satellite data). *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa*. 2010. Vol. 7, No. 3. P. 215–225.
3. Bartalev S.A., Stycken F.V., Egorov V.A., Lupjan E.A. Sputnikovaja ocenka gibeli lesov Rossii ot pozharov (Satellite-based assessment of Russian forest fire mortality). *Lesovedenie*. 2015. No. 2. P. 83–94.
4. Chu T., Guo X., Takeda K. Effects of burn severity and environmental conditions on post-fire regeneration in Siberian larch forest. *Forests*. 2017. Vol. 8, № 3. (Art. № 76). <https://doi.org/10.3390/f8030076>.
5. 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*. 2005. Vol. 14, No. 2. P. 189-198. <https://doi.org/10.1071/WF04010>.
6. French N.H.F., Kasischke E.S., Hall R.J., Murphy K.A., Verbyla D.L., Hoy E.E., Allen J.L. Using Landsat data to assess fire and burn severity in the North American boreal forest region: An overview and summary of results. *International journal of wildland fire*. 2008. Vol. 17, No. 4. P. 443–462. <https://doi.org/10.1071/WF08007>.
7. Furyaev V.V. Pyrological regimes and dynamics of the southern Taiga forests in Siberia. Fire in ecosystems of boreal Eurasia forestry sciences. Goldammer J.G. and Furyaev V.V. eds Dordrecht: Springer, 1996. P. 168–185.
8. Giglio L., Boschetti L., Roy D.P., Humber M.L., Justice C.O. The collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product. *Remote Sensing of Environment*. 2018. Vol. 217. P. 72 – 85. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.005>.
9. 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. P. 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>.
10. Ivanova G.A., Ivanov V.I. Fire regimes in Siberian forests. *International forest fires news*. 2005. № 32. P. 67–69. Available at: <https://gfmc.online/wp-content/uploads/11-Ivanova-1.pdf>.
11. Key C.H., Benson N. Landscape assessment: sampling and analysis methods. *FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system*. Lutes R.D.C., Keane J.F., et al. eds. (USDA Forest Service: Rocky Mountain Research Station), 2005.
12. Kharuk V.I., Antamoshkina O.A. Impact of silkmouth outbreak on taiga wildfires. *Contemporary problems of ecology*. 2017. Vol. 10, No. 5. P. 556-562. <http://dx.doi.org/10.1134/S1995425517050055>.
13. Krylov A., McCarty J., Potapov P., Loboda T., Tyukavina A., Turubanova S., Hansen M. Remote sensing estimates of stand-replacement fires in Russia, 2002–2011. *Environmental research letters*. 2014. Vol. 9, No. 10, Art № 105007.
14. Kukavskaya E.A., Buryak L.V., Shvetsov E.G., Conard S.G., Kalenskaya O.P. 2016 The impact of increasing fire frequency on forest transformations in southern Siberia. *Forest ecology and management*. 2016. Vol. 382. P. 225-235. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.015>.
15. Leskinen P., Lindner M., Verkerk P.J., Nabuurs G.J., Van Brusselen J., Kulikova E., Hassegawa M., Lernik B. (eds.). Russian forests and climate change. What science can tell us 11. 2020. European Forest Institute. <https://doi.org/10.36333/wsctu11>.
16. Shvetsov E.G., Kukavskaya E., Shestakova T., Laflamme J., Rogers B.M. Increasing fire and logging disturbances in Siberian boreal forests: a case study of the Angara region. *Environmental research letters*. 2021. Vol. 16, No. 11. 115007. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ac2e37>

17. Sorbel B., Allen J. Space-based burn severity mapping in Alaska's National Parks // Alaska Park Science. 2005. No. 4., P. 4-11. <https://www.nps.gov/articles/aps-v4-i1-c1.htm>.
18. Vermote E.F. MOD09A1 MODIS Surface Reflectance 8-Day L3 Global 500 m SIN Grid V006. 2015. NASA EOSDIS Land Processes DAAC.