

УДК 528.88:630.181

*Курганович Константин Анатольевич*  
*Konstantin Kurganovich*

*Макаров Владимир Петрович*  
*Vladimir Makarov*



## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ NDVI ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ПОЖАРОВ НА ДИНАМИКУ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ЦАСУЧЕЙСКОГО БОРА**

## **THE USE OF NDVI VEGETATION INDICES TO ASSESS THE INFLUENCE OF WILDFIRES ON TSASUCHEY PINE FOREST VEGETATION DYNAMICS**

Описан опыт использования данных дистанционного зондирования для изучения влияния пожаров на динамику растительности Цасучейского бора в 2000-2013 гг. Проведен анализ временных рядов среднегодовых значений вегетационных индексов NDVI для пробных площадей в растительных сообществах с разной степенью нарушенности пожарами. В качестве исходных данных дистанционного зондирования поверхности Земли использовались космические снимки спектрорадиометра MODIS с космических аппаратов Terra и Aqua за период с 05.03.2000 г. по 26.12.2013 г. Для получения информации о сгоревших площадях использовались данные продукта MCD45A1 (ежемесячные сведения о сгоревших площадях с пространственным разрешением 500 м). Для анализа вегетационных индексов NDVI использовались данные продукта MOD13A2. Установлено, что исследованные временные ряды NDVI позволяют количественно охарактеризовать отклик растительных сообществ на внешние воздействия, изучить их многолетнюю динамику. Для Цасучейского бора период 2000-2013 гг. отмечен значительным воздействием пожаров, которые способствовали изменению облика лесных сообществ на всей его территории. Области бора, длительное время не подверженные возгоранию, проявляли способности к восстановлению растительного покрова, что отражалось в увеличении индекса NDVI

This article describes the experience of using remote sensing data to study the effect of wildfire on Tsasuchey pine forest vegetation dynamics in 2000-2013. The analysis of the average annual NDVI for trial plots in plant communities with varying degrees of wildfire damage has been made. The data sources were the Earth remote sensing satellite images MODIS sensor with the spacecraft Terra and Aqua. The data for the period from 05.03.2000 to 26.12.2013 have been analyzed. In order to obtain information about the burnt areas data of the product MCD45A1 (monthly data on the burned areas with 500 m spatial resolution) have been used. For the analysis of NDVI vegetation indices product MOD13A2 has been used. It was found that the investigated NDVI time series could describe the response of plant communities to external influences and examine their long-term dynamics. During 2000-2013 Tsasuchey pine forest was exposed to significant amount of wildfires. They have changed the forest ecosystem on its whole territory. Pine forest areas that were not subject to wildfire for a long time showed the ability to revegetation, which was reflected in the NDVI increasing

**Ключевые слова:** растительность, пожар, дистанционное зондирование, вегетационный индекс, MODIS, NDVI

**Key words:** vegetation, fire, remote sensing, vegetation index, MODIS, NDVI

---

Многолетние климатические изменения на территории Забайкалья накладывают свой отпечаток на растительные сообщества [6, 7]. Снижение увлажненности территории, увеличение вегетационного периода, значительное воздействие пожаров способствуют изменению облика наземных экосистем на площади всего региона. Наиболее уязвимыми в условиях изменения климата стали массивы сосновых боров в степной зоне Забайкальского края, самым уникальным из которых является Цасучейский бор [5]. Расположенный на правом берегу реки Онон, изолированный реликтовый сосновый массив леса естественного происхождения занимает 96,7 тыс. га, его общая протяженность составляет более 60 км, ширина изменяется от 10 до 20 км [8]. Уникальность бора заключается в том, что он образован особым экотипом

сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*), названной сосной Крылова (*Pinus sylvestris* subsp. *krylovii* (Serg, et Kondr.) Busik), произрастающей за пределами своего зонального ареала распространения [3]. Сосна отличается в основном большей продолжительностью жизни и длиной хвои, а также более крупными размерами шишек. Этот подвид нуждается в особой охране как источник ценного генетического материала, но вследствие участившихся крупных лесных пожаров в течение последних двух десятилетий Цасучейский бор был практически полностью уничтожен. Целью данного исследования является анализ многолетних изменений в растительных сообществах бора под воздействием пожаров с использованием наземных и дистанционных методов мониторинга.

#### *Использование вегетационных индексов для исследования динамики растительности*

В настоящее время при изучении отклика растительности на крупномасштабные климатические изменения все более широкое применение получают данные дистанционного зондирования Земли. В таких исследованиях на космических снимках анализируются изменения вегетационных индексов – показателей, представляющих собой комбинацию из различных спектральных каналов излучения, отраженного от изучаемого объекта [1]. Самый распространенный и наиболее часто используемый вегетационный индекс – NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – нормализованный разностный вегетационный индекс [2]. Эмпирически установлено, что NDVI имеет связь с различными характеристиками растительности на исследуемой территории – прослеживается согласованность в изменении NDVI и величины зеленой растительной биомассы, проективного пок-

рытия или продуктивности [4]. Поэтому данный индекс можно использовать для регионального картографирования и анализа различных типов ландшафтов, изучения динамики растительных сообществ.

Современные системы дистанционного зондирования позволяют получать непрерывные временные ряды NDVI со всеми возможностями их статистического анализа (выделение тренда, сезонных и многолетних циклических компонент). Временные ряды среднегодовых значений NDVI позволяют количественно охарактеризовать отклик растительных сообществ на внешние воздействия, изучить их многолетнюю динамику [11].

В данной работе в качестве исходных данных дистанционного зондирования поверхности Земли (ДЗЗ) использовались космические снимки спектрорадиометра MODIS с космических аппаратов Terra и

Аqua за период с 05.03.2000 г. по 26.12.2013 г. Для анализа были приняты прошедшие предварительную обработку и свободно распространяемые продукты архивного центра изучения суши NASA LP DAAC (<https://lpdaac.usgs.gov/>):

– *MOD13A2* - Vegetation Indices 16-Day L3 Global 1km, сведения о пространственном распределении значений вегетационных индексов NDVI с разрешением на местности 1 км и периодичностью 16 суток;

– *MCD45A1* - Burned Area Monthly L3 Global 500m, сведения о пожарах на исследуемой территории с пространственным разрешением 500 м и периодичностью 1 месяц.

Исходные данные дистанционного зондирования подвергались обработке, пере-

проецированию, контролю выпадающих значений с использованием программного обеспечения ArcGIS и HEG-Tool, стандартной программы для обработки данных MODIS, рекомендуемой поставщиком. Полученные откорректированные растры служили основой для извлечения характеристик подстилающей поверхности и использовались в дальнейших расчетах. Выбор данных MODIS обусловлен наличием качественной системы предоставления обработанных снимков в виде растров с указанием уровня достоверности полученных значений, а также возможностью получения временных рядов исследуемых характеристик с разной периодичностью [10].

*Исследование динамики растительных сообществ в Цасучейском бору за период 2000-2013 гг.*

За исследуемый период на изменения в растительных сообществах Цасучейского бора значительное влияние оказывали пожары, случавшиеся практически ежегодно. Для получения информации о сгоревших площадях использовались данные продукта *MCD45A1* (ежемесячные сведения о сгоревших площадях с пространственным разрешением 500 м).

На рис. 1 представлена сводная картина пожаров за период с 2000 по 2013 гг. на территории Цасучейского бора. В качестве основы для рисунка использован снимок Landsat-5 TM LT51260251987258BJC00 от 15.09.1987 г., полученный через сервис Earth Explorer (<http://earthexplorer.usgs.gov>). Интенсивность красной заливки показывает повторные пожары на одной и той же территории, белые области отмечают нетронутые огнем участки бора. Таким образом, за рассматриваемый период времени пожарами была охвачена почти вся площадь Цасучейского бора.

При анализе данных дистанционного зондирования основополагающей является

информация, полученная в результате проведения наземных наблюдений. Для исследования динамики растительных сообществ, в 2014 г. в Цасучейском бору было заложено 15 пробных площадей, из них 5 постоянных, (см. рис. 1) в растительных сообществах с разной степенью нарушенности пожарами (см. таблицу). Большинство пробных площадей заложено в естественных насаждениях сосны обыкновенной, пострадавших от пожаров 2011 и 2012 гг. В качестве контроля для сравнения структуры и состояния насаждений подобраны площади на длительно не горевших участках Цасучейского бора. Кроме того, часть пробных площадей расположена на старых горях с возобновлением осины, а также на участке разнотравной степи, образовавшейся на месте сгоревшего соснового леса.

Сведения о растительности с пробных площадей позволяют сопоставить значения вегетационных индексов NDVI и реальных характеристик растительного покрова на изучаемой территории.

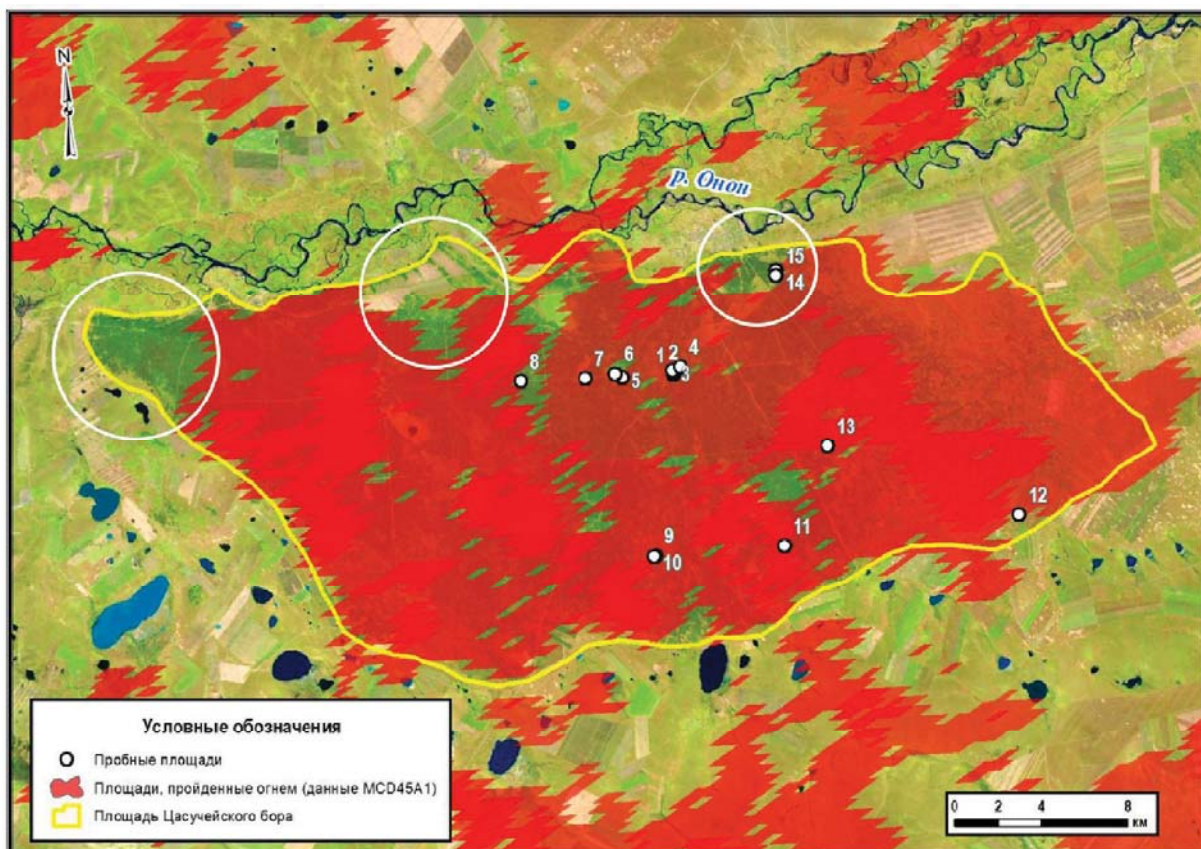


Рис. 1. Площади, пройденные огнем за период с 2000 по 2013 гг. в Цасучейском бору, по данным MCD45A1, цифрами обозначены пробные площади, заложенные в 2014 г.

**Характеристика растительных сообществ пробных площадей в Цасучейском бору в 2014 г.**

Номер пробной площади	Географические координаты, град.	Тип растительного сообщества	Состав древостоя	Ср. высота, м	Ср. диаметр, см	Вид и сила пожара	Год пожара
1	N: 50.45530 E: 115.08909	—	10С ед.Ос	15,3±0,3	21,2±0,8	Верховой, средняя	2012
2	N: 50.45643 E: 115.08958	—	10С	14,6±1,2	18,6±2,4	Верховой, сильная	2011
3	N: 50.45707 E: 115.08840	Осинник разнотравный	100с	1,5±0	2,0±0	Верховой, сильная	2006
4	N: 50.45840 E: 115.09367	—	100с	2,0±0	3,0±0	Верховой, сильная	2006
5	N: 50.45527 E: 115.05579	Степь разнотравная	—	—	—	Верховой, сильная	1998
6	N: 50.45695 E: 115.05144	—	10С	15±1,7	16,3±1,5	Верховой, сильная	2012
7	N: 50.45562 E: 115.03183	Культуры сосны	10Сед.Ос	2,5±0,3	5,0±0	Низовой, средняя	1993
8	N: 50.45591 E: 114.99014	—	10С	15,4±0,4	19,8±0,9	Низовой, сильная	2012



Окончание таблицы

Номер пробной площади	Географические координаты, град.	Тип растительного сообщества	Состав древостоя	Ср. высота, м	Ср. диаметр, см	Вид и сила пожара	Год пожара
9	N: 50.38064 E: 115.07125	–	10С	12,8±0,1	27,7±0,7	Низовой, средняя	2001
10	N: 50.38029 E: 115.06990	–	10С	16,7±0,7	27,5±1,6	Верховой, сильная	2012
11	N: 50.38176 E: 115.15465	–	10С	19,0±1,0	19,9±3,1	Верховой, сильная	2012
12	N: 50.38899 E: 115.30788	Сосняк разнотравный	10С	10,48±0,3	16,8±1,5	Длительно не горевшее	–
13	N: 50.42216 E: 115.18633	–	10С	18,0±0	24,4±2,5	Верховой, сильная	2012
14	N: 50.49616 E: 115.15933	–	10С	22,1±8,8	19,7±1,0	Длительно не горевшее	–
15	N: 50.49427 E: 115.15917	–	10С	19,5±0,5	29,8±5,0	Длительно не горевшее	–

*Методика обработки временных рядов NDVI*

Для анализа вегетационных индексов NDVI использовались данные продукта MOD13A2, состоящие из 12 растровых слоев, включающих, в том числе, композитные растры NDVI и 16-битные бинарные данные контроля ошибок (QA). Из растров извлекались числовые характеристики NDVI, соответствующие точкам наземных наблюдений, и формировались в виде временных рядов. Следует отметить, что точки 1, 2, 3 и 9, 10 соответственно находились друг от друга на расстоянии, не превышающем разрешение снимка (1 км) и попадали внутрь одного пиксела, поэтому для дальнейших исследований характеристик вегетационных индексов их пришлось объединить.

Полученные временные ряды NDVI были подвергнуты оценке качества пикселей изображения (QA), в результате чего отбракованы anomalно высокие и низкие значения вегетационных индексов, возникшие из-за влияния облачности и дыма (рис. 2, а). Для дальнейшего удаления погрешностей определения NDVI, связанных с эффектами отражения излучения от снегового покрова, из временных рядов устранены пиксели изображения, соответствующие маске снега. В итоге остались числовые последовательности NDVI, характеризующие период вегетации, которые усреднялись за год и в дальнейших исследованиях были приняты за основу (рис. 2, б) [9].



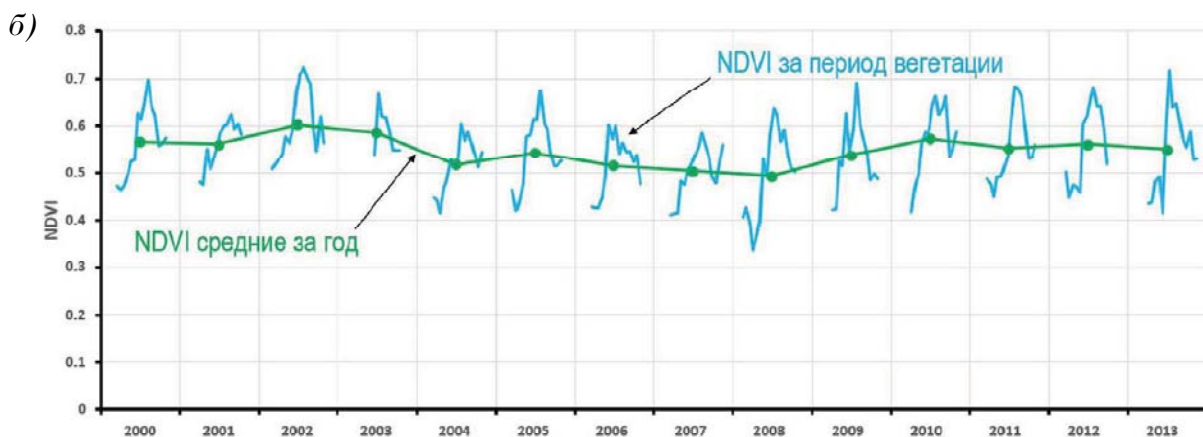


Рис. 2. Исходный (а) и усредненный (б) временные ряды NDVI

### Анализ динамики среднегодовых значений NDVI

Исследование временных рядов среднегодовых значений NDVI для пробных площадей позволяет отметить особенности динамики растительных сообществ на изучаемой территории. На рис. 3 представлены графики хода значений NDVI за рассматриваемый период для тестовых площадей с разными типами растительности. Отчетливо выделяется область длительно не горевшего сосняка (14), принимающая наибольшие среди других типов покрытий

значения NDVI. Более низкие значения вегетационных индексов принимают площади, покрытые осинником разнотравным (1-3), степь разнотравная (5) и искусственно посаженные культуры сосны (7). Межгодовые вариации значений индексов распространяются на все типы растительных сообществ и на графике видна согласованность колебаний величин NDVI в многолетнем разрезе.

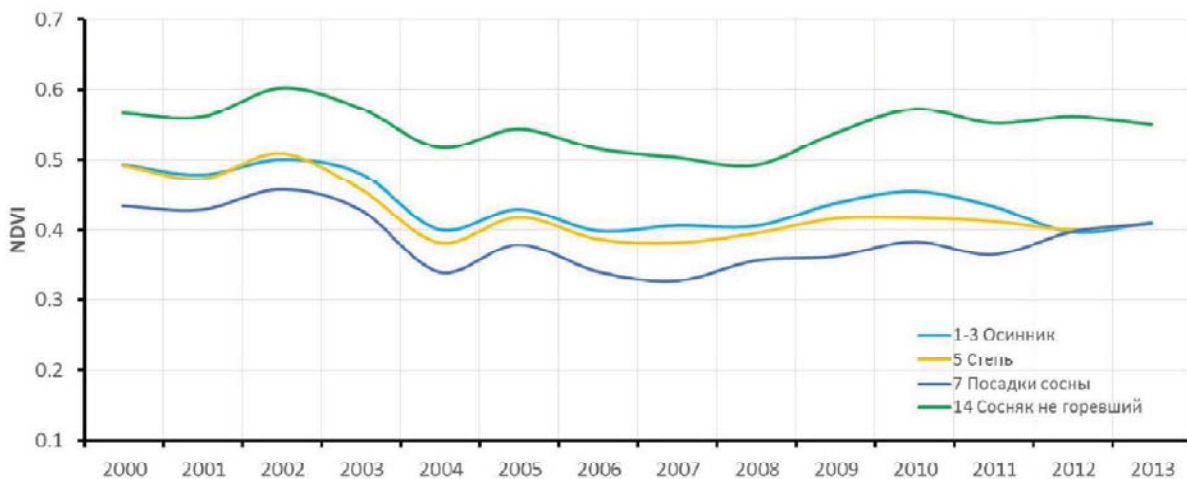


Рис. 3. Ход среднегодовых значений NDVI для разных типов растительности за период с 2000 по 2013 гг.

Анализ временных рядов NDVI для площадей, в разные годы пострадавших от воздействия лесных пожаров, позволя-

ет выявить отклик лесных экосистем на внешнее воздействие и количественно охарактеризовать потенциал восстановления

растительного покрова на изучаемой территории. На рис. 4 представлен совместный ход вегетационных индексов для близких по расположению областей (1-3) и (4), занятых осинником разнотравным. В конце рассматриваемого временного интервала (2013) значения NDVI для этих площадок практически не отличаются, тем не менее, в начале периода наблюдений (2000) отчетливо видна разница между ними. Можно сделать предположение об изменении

видового состава в точке (4) с пород с более густой растительностью (возможно, сосняк) на породы с более разреженной (осинник). Такое изменение может быть связано с воздействием пожара 2003 г., в связи с чем NDVI за один сезон падает с 0,63 до 0,44 и в последующие годы остается в этих пределах. Для сравнения на этом же рисунке представлен график хода NDVI для сосняка, не подверженного пожарам.

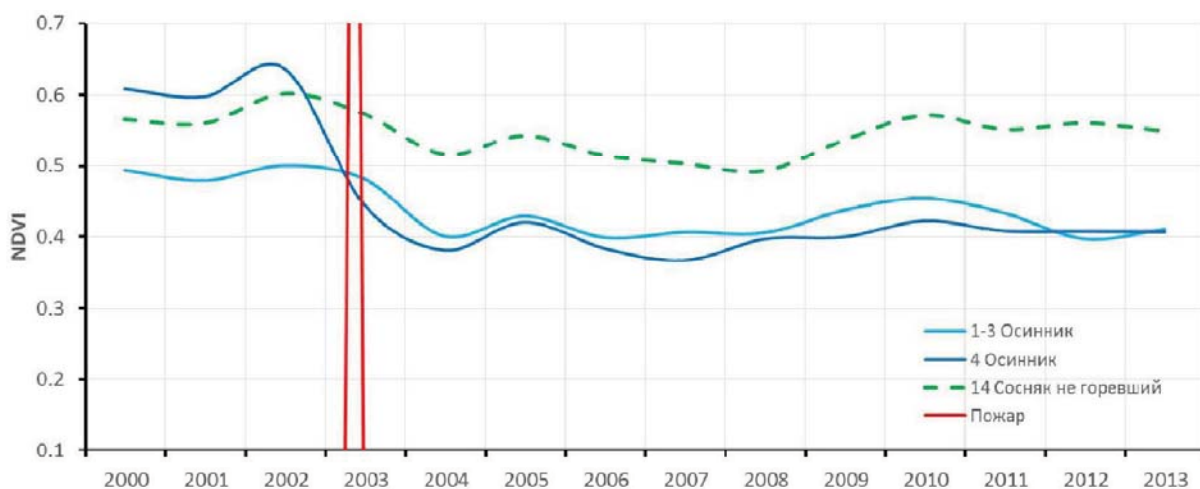


Рис. 4. Совместный ход среднегодовых значений NDVI для тестовых площадок (1-3) и (4)

Подобные выводы можно сделать и для площадей (14) и (15), обозначенных как длительно не горевшие (рис. 5). Исходя из хода NDVI за 2000-2013 гг. можно предпо-

ложить, что в точке (15) в 2003 г. наблюдался пожар, который привел к резкому падению вегетационного индекса.

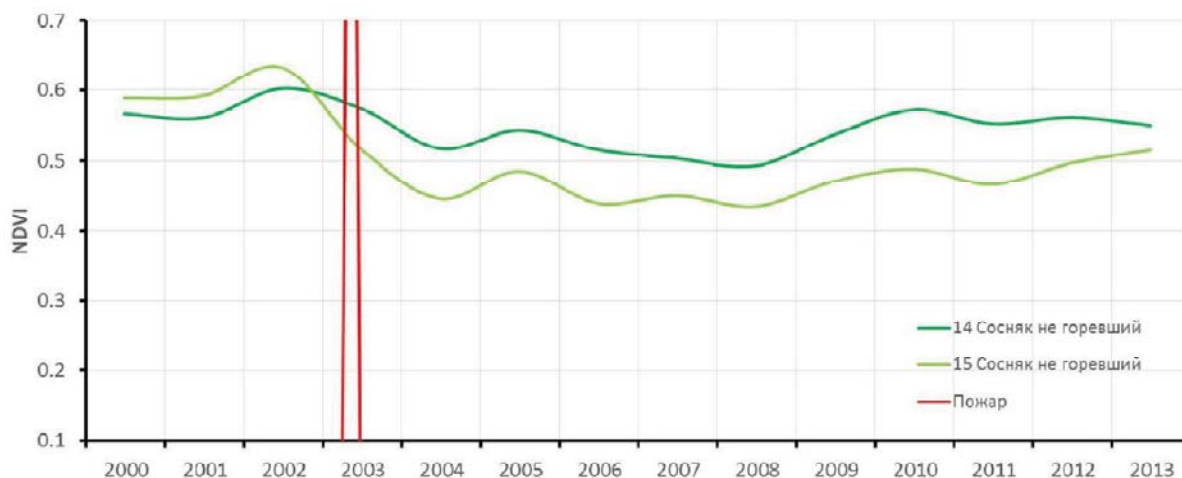


Рис. 5. Совместный ход среднегодовых значений NDVI для тестовых площадок (14) и (15)

По данным *MCD45A1* (рис. 1), Тестовая площадь (13) была подвержена воздействию пожаров дважды – в 2003 г. и в 2012 г. До первого пожара значения вегетационного индекса для этой площади составляли 0,51...0,55, после пожара 2003

г. произошло резкое падение NDVI до 0,46 (рис. 6). За период до 2012 г. в результате восстановления растительного покрова отмечался рост индекса до 0,5. После сильного верхового пожара в 2012 г. NDVI резко упал до 0,41.

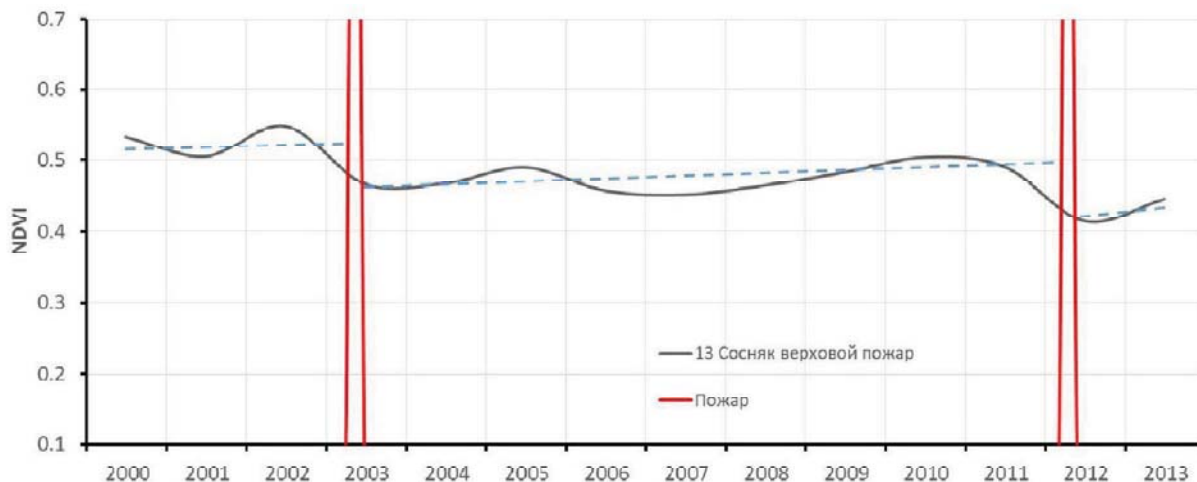


Рис. 6. Восстановление растительного покрова между пожарами в 2003 и 2012 гг. на тестовой площади (13)

Анализ различий в изменении NDVI после воздействия на растительный покров верхового и низового пожаров не позволил установить однозначную связь для этих явлений. Пробные площади (8) и (11), на которых в 2012 г. наблюдались соответствен-

но низовой и верховой пожары, на данный момент не показывают значимых отличий между собой, возможно, для их установления потребуются наблюдения в будущем (рис. 7).

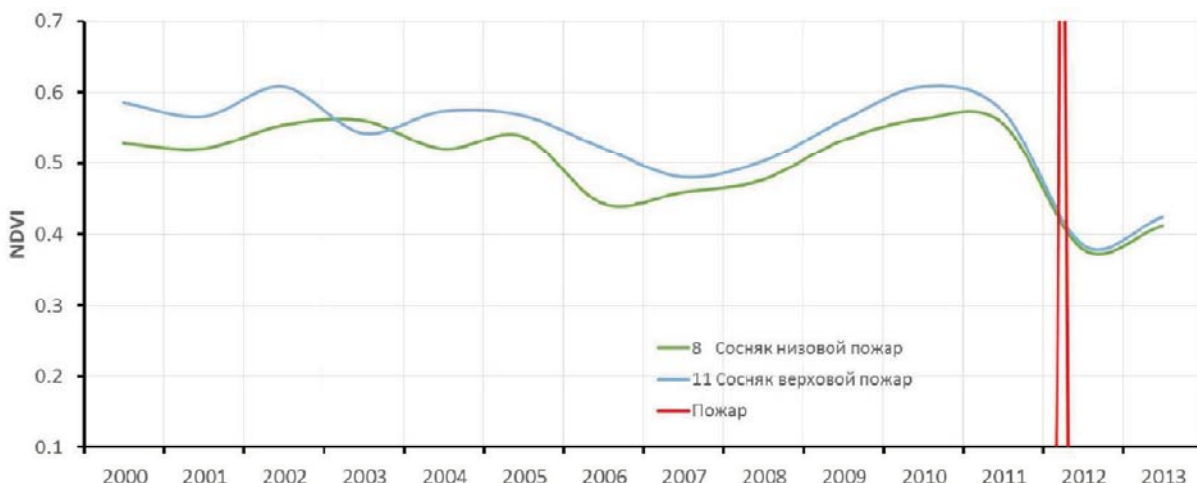


Рис. 7. Ход среднегодовых значений NDVI для пробных площадей (8) и (11) и воздействие верхового и низового пожаров в 2012 г.



Таким образом, в результате проведенного анализа установлено, что временные ряды среднегодовых значений NDVI позволяют количественно охарактеризовать отклик растительных сообществ на внешние воздействия, оценить их многолетнюю динамику. Для Цасучейского бора период 2000-2013 гг. отмечен значительным воз-

действием пожаров, которые способствовали изменению облика лесных сообществ на всей его территории. Области бора, длительное время не подверженные возгоранию, проявляли способности к восстановлению растительного покрова, что отражалось в увеличении индекса NDVI.

## Литература

## References

1. Барталев С.А., Егоров В.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. № 4. С. 285-302.
2. Барталев С.А., Егоров В.А., Крылов А.М., Стыщенко 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. № 3. С. 215-225.
3. Вахнина И.Л. Древесно-кольцевой анализ периодичности засух в северной части Даурского экорегиона // Природоохранное сотрудничество: Россия, Монголия, Китай. 2011. № 2. С. 26-29.
4. Малышева Н.В., Рыгалов Е.В., Плуталова Т.Г. Изучение ленточных боров Алтайского края методами дендрохронологии и дистанционного зондирования // Известия Алтайского государственного университета. 2013. № 3-1 (79). С. 134-137.
5. Обязов В.А. Изменение климата и гидрологического режима рек и озер в даурском экорегионе // Проблемы адаптации к изменению климата в бассейнах рек Даурии: экологические и водохозяйственные аспекты. Сборник научных трудов государственного природного биосферного заповедника «Даурский». Чита: Экспресс-издательство, 2012. С. 24-45.
6. Обязов В.А. Изменения климата в междурье Аргуни и Онона в контексте глобального потепления // Вестник Забайкальского государственного университета. 2011. № 7. С. 78-85.
7. Обязов В.А. Многолетние изменения температуры воздуха в Юго-Восточном Забайкалье // Известия Русского географического общества. 1996. № 3. С. 66-73.
8. Пак Л.Н., Бобринев В.П. Приживаемость, сохранность и рост лесных культур сосны в Цасучейском бору // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. № 3-3. С. 1056-1059.
9. Cuevas-Gonzalez M., Gerard F., Balzter H., Riano D. Analysing forest recovery after wildfire disturbance in boreal Siberia using remotely sensed vegetation indices // Global Change Biology (Global Change Biology), 2009, no. 15, p. 561-577.
1. Bartalev S.A., Egorov V.A., Ershov D.V., Isaev A.S., Lupyan E.A., Plotnikov D.E., Uvarov I.A. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa* (Current problems in remote sensing of the earth from space), 2011, no. 4, p. 285-302.
2. Bartalev S.A., Egorov V.A., Krylov A.M., Stytsenko F.V., Khovratovich T.S. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa* (Current problems in remote sensing of the earth from space), 2010, no. 3, p. 215-225.
3. Vakhnina I.L. *Prirodoohrannoe sotrudnichestvo: Rossiya, Mongoliya, Kitay* (Environmental Cooperation: Russia, Mongolia, China), 2011, no. 2, p. 26-29.
4. Malysheva N.V., Rygalov E.V., Plutalova T.G. *Izvestiya Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta* (The News of Altai State University), 2013, no. 3-1 (79), p. 134-137.
5. Obyazov V.A. *Problemy adaptatsii k izmeneniyu klimata v basseynah rek Daurii: ekologicheskie i vodohozyaystvennye aspekty* [Problems of adaptation to climate change in the basins of Dauriya: environmental and water issues]. Chita: Express-izdatelstvo, 2012. P. 24-45.
6. Obyazov V.A. *Vestn. Zab. Gos. Univ.* (Transbaikalian State University Journal), 2011, no. 7, p. 78-85.
7. Obyazov V.A. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva* (Proceedings of the Russian Geographical Society), 1996, no. 3, p. 66-73.
8. Pak L.N., Bobrinev V.P. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* (Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences), 2013, no. 3-3, p. 1056-1059.
9. Cuevas-Gonzalez M., Gerard F., Balzter H., Riano D. *Global Change Biology* (Global Change Biology), 2009, no. 15, p. 561-577.

etation indices // *Global Change Biology*. 2009. № 15. P. 561-577.

10. Huete A., Didan K., van Leeuwen W., Miura T., Glenn E. *MODIS Vegetation Indices* // *Land Remote Sensing and Global Environmental Change. NASA's Earth Observing System and the Science of ASTER and MODIS*. New York: Springer, 2011. P. 579-603.

11. Mao D., Wang Z., Luo L., Ren C. Integrating AVHRR and MODIS data to monitor NDVI changes and their relationships with climatic parameters in Northeast China // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2012. № 18. P. 528-536.

10. Huete A., Didan K., van Leeuwen W., Miura T., Glenn E. *MODIS Vegetation Indices* [MODIS Vegetation Indices]: *Land Remote Sensing and Global Environmental Change. NASA's Earth Observing System and the Science of ASTER and MODIS*. New York: Springer, 2011. P. 579-603.

11. Mao D., Wang Z., Luo L., Ren C. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* (International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation), 2012, no. 18, p. 528-536.

---

### **Коротко об авторах**

### **Briefly about the authors**

**Курганович К.А.**, канд. техн. наук, доцент, научный сотрудник лаборатории региональной климатологии, ИПРЭК СО РАН, заведующий кафедрой «Водное хозяйство и инженерная экология», Забайкальский государственный университет, г. Чита, РФ

kurganovich@pochta.ru

**Научные интересы:** моделирование гидрологических процессов, дистанционное зондирование Земли

**Макаров В.П.**, канд. биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории растительных ресурсов, ИПРЭК СО РАН, г. Чита, РФ

vm2853@mail.ru

**Научные интересы:** биологическое разнообразие лиственницы, изучение морфологических особенностей, развития и ход роста лиственницы в географических культурах и в природных популяциях Забайкальского края

**K. Kurganovich**, candidate of technical sciences, associate professor, research associate of the Regional Climatology Laboratory, INREC SB RAS, Head of the Water Management and Engineering Ecology department, Transbaikal State University, Chita, Russia

**Scientific interests:** modeling of hydrological processes, remote sensing of the environment

**V. Makarov**, candidate of biological sciences, senior researcher of the Plant Resources Laboratory, INREC SB RAS, Chita, Russia

**Scientific interests:** biological diversity of larch, study of morphological features, development and progress in the growth of larch provenance and in natural populations of the Transbaikal region

