

ОЦЕНКА НАРУШЕННОСТИ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ ПОСЛЕ ПОЖАРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕШИФРИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

¹Рожков Ю.Ф., ²Кондакова М.Ю.

¹ФГБУ «Государственный природный заповедник «Олекминский»,
Олекминск, e-mail: oлектазар-nauka@yandex.ru;

²ФГБУ «Гидрохимический институт», Ростов-на-Дону, e-mail: vesna-dm@mail.ru

Целью настоящего исследования было сравнение традиционного способа оценки нарушенности лесных экосистем после пожара по изменению индекса вегетации NDVI и классификации «без обучения» методом ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique) для мультиспектральных снимков. В качестве критериев нарушенности структуры экосистемы выбраны стандартные статистические инструменты: дисперсия, среднее отклонение, стандартное отклонение, а также показатель симметрии распределения пикселей в результате классификации по методу Isodata. В качестве объекта статистической обработки выбраны результаты классификации участка космического снимка, который необходимо оценить на нарушенность. В результате анализа полученных результатов показано, что по показателю NDVI сразу после пожара отмечаются отрицательные или нулевые значения, которые увеличиваются по мере восстановления лесов. При сравнении результатов классификации методом ISODATA показано, что нарушенные лесные экосистемы имеют значения статистических показателей (стандартное отклонение, среднее отклонение, дисперсия) в 2–10 раз меньшие, чем ненарушенные экосистемы. По показателю симметрии распределения пикселей показано, что нарушенные участки леса имеют сумму пикселей в нижней половине результатов классификации большую, чем в верхней половине результатов классификации. Тогда как ненарушенные участки леса имеют сумму пикселей в верхней половине результатов классификации большую или равную результатам классификации нижней половины.

Ключевые слова: дешифрирование космических снимков, индекс NDVI, классификация Isodata

ASSESSMENT OF FOREST ECOSYSTEMS VIOLATIONS AFTER FOREST FIRES USING INTERPRETATION OF SPACE IMAGES

¹Rozhkov Y.P., ²Kondakova M.Y.

¹State Nature Reserve «Olekminsky», Olekminsk, e-mail: r1953@rambler.ru;

²Hydrochemical Institute, Rostov-on-Don, e-mail: vesna-dm@mail.ru

The purpose of this study was to compare the traditional method of estimating the disturbance of forest ecosystems after fire change-NDVI vegetation index and classification «without learning» method ISODATA for multispectral images. The criteria for disturbance of ecosystem structure chosen standard statistical tools: the variance, average deviation, standard deviation, as well as indicators of symmetry distribution of pixels in the resulting classification method ISODATA. As the object of statistical processing of the results of selected area of the satellite image classification, which is necessary to evaluate on offense. An analysis of the results shows that in terms of NDVI observed immediately after the fire negative or zero values, which increase as reforestation. When comparing the results of classification by ISODATA undisturbed and disturbed forest sites shows that the variance, mean and standard deviation of the results differ. Disturbed forest ecosystems have values of statistical indicators standard deviation, mean deviation, variance in the 2–10 times less than the undisturbed ecosystems. In terms of symmetry of pixels shown that the disturbed areas of the forest have the sum of pixels in the bottom half of the classification results greater than in the upper half of the classification results. Whereas undisturbed forest areas have the sum of pixels in the upper half of the classification results greater than or equal to the lower half of the classification results.

Keywords: interpretation of satellite images, the index NDVI, classification Isodata

Для решения вопросов оперативного мониторинга состояния экосистем и оценки их нарушенности с использованием дешифрирования космических снимков используются различные методы, основанные на анализе изменений спектральных характеристик и оптической плотности на снимках. В случае анализа нарушенности лесных экосистем послж пожаров широко используется оценка по хлорофильному индексу-MTCSI [1], эмиссии углерода в результате пожаров [2, 3], индексу вегетации NDVI, нормализованному индексу гарей – NBR [4, 5]. В основе перечисленных индексов

заложена закономерная связь уменьшения концентрации хлорофилла, продуктивности, биомассы растений с увеличением нарушенности экосистем.

Недостатком этих традиционных методов определения является зависимость спектральной яркости от различных факторов, связанных с условиями съемки: сезонностью, состоянием атмосферы, типом съёмочной камеры и её ориентацией.

Появляется необходимость выявления других признаков, взятых для дешифрирования. Влиянию перечисленных недостатков менее подвержены методы, основанные

на оценке нарушенности экосистемы по изменению её структуры. При этом оцениваются изменения самой структурной организации экосистемы независимо от типа съёмочной камеры, спектральных характеристик снимка, сезонности, состояния атмосферы.

В основу предлагаемого метода оценки заложен фундаментальный принцип экологии: при нарушении структурной организации экосистемы в результате экстремального воздействия уменьшается её биоразнообразие, упрощается структурная организация экосистемы, разрушаются структурно-функциональные связи. Это разрушение структурной организации экосистемы обнаруживается при использовании классификации космических снимков методом ISODATA. Подобный метод выбран для оценки нарушения упорядоченности ландшафтов после пожаров или других воздействий, разрушающих структуру экосистемы.

Целью настоящего исследования было сравнение традиционного способа оценки нарушенности лесных экосистем после пожара по изменению индекса вегетации- NDVI и классификации «без обучения» методом ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technigue) для мультиспектральных снимков. В качестве критериев нарушенности структуры экосистемы выбраны стандартные статистические инструменты: дисперсия, среднее отклонение, стандартное отклонение. В качестве объекта статистической обработки выбраны результаты классификации участка космического снимка, который необходимо оценить на нарушенность.

Материал и методы исследования

Для осуществления непрерывного мониторинга за состоянием бореальных лесов использовалось дешифрирование мультиспектральных космических снимков высокого разрешения Landsat TM/ETM+, Aster, Spot, ИРС, сделанных в период с 1995 по 2010 гг. Все снимки прошли радиометрическую и геометрическую коррекцию. Исследования проводились на территории Юго-Западной Якутии на территории площадью 1 млн га. Для обработки космических снимков использовался пакет программ ENVI-4.0, ArcView-3.3 с модулями Image Analyst, Spatial Analyst. В качестве показателей, с помощью которых осуществлялся мониторинг состояния лесов, были использованы индекс вегетации (NDVI) и стандартные статистические показатели: дисперсия, среднее и стандартное отклонения результатов классификации мультиспектральных снимков, проведенной по методу ISODATA.

В качестве модельной гари нами была выбрана гарь 1985 года, охватившая территорию на площади 47480 га (рис. 1). Кроме того, были исследованы гари, образовавшиеся на территории региона за период с 1987 по 2013 гг.

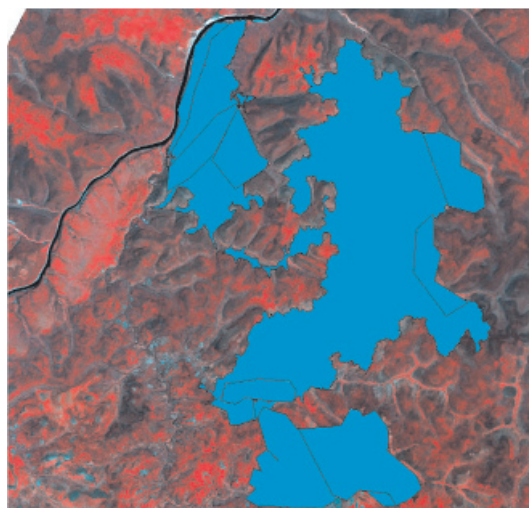


Рис. 1. Граница зарастающего пожара 1985 года

1. Индекс NDVI

NDVI может быть рассчитан на основе любых снимков высокого, среднего или низкого разрешения, имеющим спектральные каналы в красном (0,55–0,75 мкм) и инфракрасном диапазоне (0,75–1,0 мкм). Индекс вегетации (NDVI) вычисляли по следующей формуле:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED},$$

где *NIR* – отражение в ближней инфракрасной области спектра, *RED* – отражение в красной области спектра. Согласно этой формуле, плотность растительности (NDVI) в определенной точке изображения равна разнице интенсивностей отраженного света в красном и инфракрасном диапазоне, деленной на сумму их интенсивностей.

2. Метод классификации ISODATA использует установленное число итераций (перегруппировка пикселей по классам) и порог сходимости для выбранных классов. Процедура классификации распознает сходные пиксели по их значениям в спектральных каналах и группирует их в соответствующие классы. Выбранный метод неуправляемой классификации является самоорганизующимся, так как пользователь указывает только количество классов, на которые нужно разбить весь массив данных. Метод ISODATA позволяет провести классификацию любого космического снимка как мультиспектрального, так и монохроматического, а также результаты картирования с использованием различных производных индексов (NDVI, NBR, IMAGE DIFFERENCE и др.). В случае мультиспектрального снимка объектом итераций выступают пиксели, содержащие информацию всех спектральных каналов. Определение нарушенности экосистем состоит из следующих этапов:

1. Для сравнения берутся участки космических снимков с разной нарушенностью структуры экосистемы. Они сохраняются как картинки в формате .img. Это могут быть фрагменты космического снимка с ненарушенными лесами или фрагменты с участками, поврежденными пожарами.

2. Для каждого фрагмента проводится классификация по методу ISODATA на 10 классов.

3. Проводится стандартная статистическая обработка результатов классификации с определением четырех показателей: сумма пикселей всех десяти классов, дисперсия, стандартное и среднее отклонения для всех десяти классов. Сумму пикселей для выбранного фрагмента снимка и результатов классификации необходимо определять для проведения сравнения полученных результатов классификации с другими классификациями.

4. Рассчитывается пересчетный коэффициент между полученной суммой пикселей и взятой за основу суммой 250000 пикселей. Он может быть больше 1, если полученная сумма пикселей меньше 250000, или меньше 1, если сумма пикселей больше 250000.

5. Производится пересчет полученной дисперсии, стандартного и среднего отклонений умножением на пересчетный коэффициент. Эта операция необходима для проведения сравнения статистических показателей, полученных для разных по площади фрагментов одного космического снимка, разных космических снимков. Показатели дисперсии, стандартного и среднего отклонения зависят от размера фрагмента, типа снимка, т.к. содержат разное количество пикселей и их нужно привести к общему знаменателю, равному 250000 пикселей.

6. Проводится сравнение дисперсии, стандартного, среднего отклонений между разными фрагментами космических снимков. Разница между этими величинами и характеризует нарушенность лесных экосистем от пожаров. Дисперсия, стандартное и среднее отклонения ненарушенных фрагментов больше этих величин для нарушенных участков леса на величину от 2 до 10 раз. То есть структура нарушенных экосистем почти на порядок беднее структуры ненарушенных экосистем.

Кроме того, в качестве критерия нарушенности лесных экосистем после пожаров предлагается показатель, основанный на расчете симметрии распределения пикселей в результатах классификации территории по методу Isodata. В отличие от расчетов дисперсии, стандартного и среднего отклонений, зависящих от размеров площади, для которой проводится классификация, показатель симметрии распределения пикселей не зависит от площади фрагмента, для которого проводится классификация. Расчет показателя симметрии распределения производится в два этапа:

1. Проводится классификация выбранного фрагмента снимка или снимка целиком на любое четное количество классов: 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20 и т.д.

2. Каждый результат классификации делится строго пополам. Рассчитывается сумма пикселей для каждой половины классов. И проводится сравнение результатов суммирования. Для нарушенных экоси-

стем характерно превышение суммы пикселей для нижней половины над суммой пикселей верхней половины результатов классификации. Тогда как ненарушенные экосистемы характеризуются равенством или превышением суммы пикселей верхней половины над суммой пикселей нижней половины результатов классификации.

Результаты исследования и их обсуждение

1. Оценка нарушенности лесных экосистем по индексу вегетации.

По значению индекса NDVI можно осуществлять картирование площадей, пройденных пожарами. В первый год после пожара значения NDVI имеют отрицательное или нулевое значение. То есть продуктивность на гари отсутствует. Участки леса, частично поврежденные пожаром, имеют значения NDVI от 0,01 до 0,1. При этом ненарушенные леса имеют значения NDVI от 0,2 до 0,7. По мере восстановления лесов после пожара индекс NDVI увеличивается. Причем спустя 20 лет после пожара значения индекса вегетации на зарастающей гари часто превышают значения индекса вегетации на прилегающих ненарушенных участках леса.

2. Изменения продуктивности в процессе зарастания гари 1985 года.

За период с 1995 по 2004 гг. на площади, пройденной пожаром, зарегистрировано увеличение продуктивности на 75% площади. Общая площадь, взятая для анализа, 453033 пикселей или 40773 га. Причем масштабы увеличения продуктивности были разными:

- на 50% – 11713 пикселей или 1054 га;
- на 30% – 48083 пикселей или 4350 га;
- на 20% – 131167 пикселей или 11805 га;
- на 10% – 346865 пикселей или 31218 га.

С помощью инструмента «Difference» можно провести сравнение индекса вегетации на снимках, сделанных в разное время. На месте зарастающей гари происходит увеличение индекса вегетации за счет поросли. При этом за период с 1995 по 2004 гг. зарастание более плавное, а за период с 2004 по 2009 гг. зарастание стремительное (рис. 2).

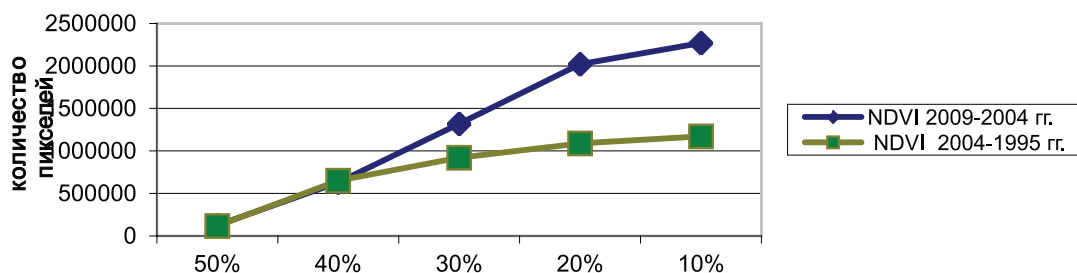


Рис. 2. Изменение интенсивности зарастания гари по изменению индекса вегетации

3. Оценка нарушенности лесных экосистем по результатам статистической обработки результатов классификации по методу ISODATA.

Нарушенные лесные экосистемы имеют значения статистических показателей (стандартное отклонение, среднее отклонение, дисперсия) в 2–10 раз меньше, чем ненарушенные экосистемы (табл. 1). Причем, в отличие от значений NDVI, эти показатели не зависят от сезонности, типа съемочной аппаратуры, её ориентации. Чем более нарушены экосистемы, тем меньше значения дисперсии, среднего и стандартного отклонений. По мере восстановления

лесных экосистем после пожаров увеличивается упорядоченность, биоразнообразие, усложняется пространственная структура. Это отражается в увеличении значений стандартного, среднего отклонений и дисперсии результатов классификации фрагментов космических снимков (табл. 2).

Если фрагменты космических снимков с интервалом съемки в один месяц (июнь и июль 1995 г.) практически не отличаются по значениям среднего, стандартного отклонений и дисперсии, то снимки с разницей в шесть и десять лет характеризуются увеличением дисперсии в 2 и более раз.

Таблица 1

Значения статистических показателей нарушенности лесных экосистем после пожаров

Снимок, дата	Ирс, пожар 2009	Ландсат пожар 2001	Астер пожар 2000	Спот пожар 2009	Ландсат ненаруш. 2001	Ландсат ненаруш. 2004	Ирс ненаруш. 2009
Коэффициент пересчета	1,07	1,79	1,30	1,50	0,94	2,26	8,80
Среднее откл.	3097	3283	7327	6071	12729	12435	13666
Стандартн. откл.	3568	4498	6066	7433	11106	14263	17178
Дисперсия	132·10 ⁵	125·10 ⁵	372·10 ⁵	331·10 ⁵	191·10 ⁶	100·10 ⁶	301·10 ⁶

Таблица 2

Изменения в структуре экосистемы в процессе восстановления после пожара

Снимок, время съемки	Разница в 10 лет		Разница в 6 лет		Разница в 3 года		Разница в месяц	
	Ландсат, июнь 1995	Ландсат, июнь 2005	Ландсат, сентябрь 2001	Спот, сентябрь 2007	Ландсат, август 2001	Ландсат, август 2004	Ландсат, июнь 1995	Ландсат, июль 1995
Средн. откл.	4499	5480	4046	4224	3404	4262	4499	4508
Станд. откл.	6275	6909	4899	5033	4492	5537	6275	6369
Дисперсия	300·10 ⁵	580·10 ⁵	183·10 ⁵	407·10 ⁵	135·10 ⁵	162·10 ⁵	300·10 ⁵	309·10 ⁵
К пересчета	1,18	0,74	1,18	0,56	1,34	1,7	1,18	1,18

Еще более независимым от сезона съемки, типа съемочной аппаратуры критерием нарушенности лесных экосистем после пожаров является показатель симметрии распределения, основанный на сравнении результатов классификации по методу ISODATA. В этом случае причина различий между двумя половинами (верхней и нижней) результатов классификации в том, что

в нижней половине классов сосредоточены пустоши и редколесья, а в верхней половине классов сосредоточены густые леса. После пожара симметрия распределения лесов по классам классификации нарушается в сторону преобладания послепожарных пустошей и редколесий. Поэтому в нижней половине классов отмечено большее количество пикселей (табл. 3).

Таблица 3

Показатель симметрии распределения пикселей при классификации ненарушенных лесов

Ненарушенный лес	Ландсат, 1995 г.			Спот, 2007 г.			ИРС 2009 г.		
	6 кл.	10 кл.	18 кл.	6 кл.	10 кл.	18 кл.	6 кл.	10 кл.	18 кл.
Общая ∑ пикс.	256956	256956	256956	127049	127049	127049	375512	375512	375512
∑ пикселей верхн. части	147829	140832	143792	68593	64599	67978	222822	219964	220011
∑ пикселей нижн. части	109127	116124	113164	58456	62450	59071	152690	155548	155501

По мере зарастания послепожарных пустошей картина распределения пикселей по классам выравнивается и сумма пикселей в верхней и нижней поло-

винах классов становится одинаковой или отмечается преобладание суммы пикселей в верхней половине над нижней (табл. 4).

Таблица 4

Показатель симметрии распределения пикселей при классификации нарушенных лесов

Нарушенный лес после пожара 1985 г.	Ландсат, 1995 г., 10 лет после пожара			Ландсат, 2001 г., 15 лет после пожара			Спот ,2009 г., 24 года после пожара		
	6 кл.	10 кл.	18 кл.	6 кл.	10 кл.	18 кл.	6 кл.	10 кл.	18 кл.
Общая Σ пикс.	331047	331047	331048	331047	331047	331047	484056	484056	484056
Σ пикс. верхн. половины	153627	155346	155258	151027	158368	160186	247354	245948	243590
Σ пикс. нижн. половины	177420	175701	175790	180020	171679	170861	236702	238108	240466

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-05-00120).

Список литературы/ References

1. Clevers J.G.P.W., et al. Derivation of the Red Edge Index using the MERIS Standard Band Setting // International Journal of Remote Sensing. – 2002. – Vol. 23. – P. 3169–3184.
2. Jadunandan Dash et al. MTCI: The MERIS Terrestrial chlorophyll index // ENVISAT Symposium Proceedings. – Austria, Salzburg, 2004
3. Hall R.J. et al. Modelling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: application to mapping of above-ground biomass and stand volume // Forest ecology and management. – 2006. – № 225. – P. 378–390.
4. Krankina O.N. et al. Carbon stores, sinks, and sources in forests of northwestern Russia can we reconcile forest inventories with remote sensing results? // Climate change. – 2004. – № 67. – P. 257–272.

4. Escuin S et al. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from Landsat TM/ETM images // Journal of Remote Sensing. – 2008. – № 29. – P. 1053–1073.

5. Hudak A.T. et al. Relationship of multispectral satellite imagery to immediate fire effects // Journal of Fire ecology. – 2007. – № 3. – P. 64–90.

Рецензенты:

Брагина Т.М., д.б.н., профессор кафедры ботаники и зоологии естественно-математического факультета, Костанайский государственный педагогический институт, г. Костанай;

Исаев А.П., д.б.н., заведующий лабораторией мерзлотного лесоведения Института биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск.

Работа поступила в редакцию 26.08.2014.