

ческие особенности здоровья студентов на Севере и возможность их коррекции // Вестник СВФУ им. М.К. Аммосова. – 2012. – Т. 9, №4. – С.25–32.

7. Тригорный С.Н. Психофизиологическая адаптация студентов высших учебных заведений:

Автореф. ... дис. канд. мед. наук. – Владивосток, 2006. – 25 с.

8. Судаков К.В., Умрюхин П.Е. Системные основы эмоционального стресса. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2010. – 112 с.

Поступила в редакцию 15.04.2016

Общая биология

УДК 528.85

Мониторинг состояния лесов с использованием кластерного анализа при дешифрировании космических снимков среднего и высокого разрешения

Ю.Ф. Рожков*, М.Ю. Кондакова**

*Государственный природный заповедник «Олекминский», г. Олекминск

**Гидрохимический институт, г. Ростов-на-Дону

Целью настоящего исследования была оценка возможности совместного использования двух инструментов кластерного анализа в мониторинге состояния лесов. Мультиспектральные космические снимки высокого и среднего разрешения Landsat TM/ETM+, Aster, Spot, IRS, сделанные с 1995 по 2011 г., и их фрагменты подвергались двухэтапной обработке. Вначале проводилась неуправляемая классификация методом ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique), затем расчет тематической разности результатов классификации. Показана перспективность показателя тематической разности пикселей при оценке нарушенности лесов от пожаров. Нарушенные участки леса имеют сумму пикселей во 2-м подклассе тематической разности большую, чем в 1-м. Тогда как ненарушенные участки леса имеют сумму пикселей в 1-м подклассе тематической разности большую или равную сумме пикселей 2-го подкласса тематической разности. Показана перспективность инструментов кластерного анализа в мониторинге сезонных изменений состояния лесов. Из сравнения двух фрагментов с доминированием лиственницы и сосны сибирской видно, что в сентябре, октябре происходит резкое увеличение пикселей во 2-м подклассе тематической разности фрагмента с доминированием лиственницы за счет увеличения доли пикселей с высокой оптической плотностью после хвоепада и листопада. Для фрагмента с доминированием сосны сибирской сезонные изменения показателя симметрии распределения пикселей менее выражены. Рассмотрена перспективность использования инструментов кластерного анализа пикселей в долговременном мониторинге состояния лесных экосистем (на примере процесса восстановления лесов после пожара). Определена скорость восстановления леса на фрагменте гари площадью 698 га. Показано, что скорость восстановления после пожара зависит от нарушенности леса после него.

Ключевые слова: дешифрирование космических снимков, классификация Isodata, тематическая разность.

Monitoring of Forest Condition Using Cluster Analysis in Interpretation Process of Middle- and High-Resolutions Satellite Images

Y.Ph. Rozhkov*, M.Y. Kondakova**

*State Nature Reserve «Olekminsky», Olekminsk

**Hydrochemical Institute, Rostov-on-Don

The purpose of this study was to find out whether it is suitable to combine two cluster analysis tools for forests condition monitoring. Multispectral satellite images of high and medium resolution Landsat

РОЖКОВ Юрий Филиппович – к.х.н., зам. директора, r1953@rambler.ru; КОНДАКОВА Мария Юрьевна – к.б.н., с.н.с., vesna-dm@mail.ru.

TM/ETM+, Aster, Spot, IRS, made between 1995 and 2011 and their fragments were subjected to two-stage processing. First uncontrolled classification method ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique) was used. Then calculation of the thematic difference of classification results was carried out. The prospects to use a parameter of pixels thematic difference for evaluation of disturbance of forests from fires is shown. For disturbed forest areas the amount of pixels in the second subclass of thematic difference is greater than in the first subclass. While undisturbed forest areas have the amount of pixels in the first subclass of thematic difference greater than or equal to the amount of pixels of the second subclass of thematic difference. The prospects of the cluster analysis tools to monitor seasonal changes in forest conditions are shown. Comparison of two fragments the first one with larch dominance and the second one with Siberian pine dominance has shown that in the autumn months the dominance of larch and pine (September, October) there is a sharp increase in pixels in the second subclass of thematic difference in the fragment with larch dominance because of the increasing of the share of pixels with high optical density after larch drop its needles and fall of the leaf. For the fragment with the dominance of Siberian pine seasonal changes in the distribution of pixel symmetry index are less pronounced. Promising tools of cluster analysis of pixels in the long-term monitoring of forest ecosystems (for example, forest restoration process after fire) are considered. The rate of forest recovery on a fragment of burnt area of 698 hectares is defined. It is shown that the rate of recovery after a fire depends on the character of disturbance of the forest after a fire.

Key words: interpretation of satellite images, Isodata classification, thematic difference, pixels.

Введение

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 от пожаров широко используется оценка по хлорофильному индексу MTCI [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 состояния экосистемы по изменению её структуры [6]. При этом оцениваются изменения самой структурной организации экосистемы независимо от типа съёмочной камеры, спектральных характеристик снимка, сезонности, состояния атмосферы.

Материалы и методы исследования

Для осуществления непрерывного мониторинга за состоянием бореальных лесов использовалось дешифрирование мультиспектральных космических снимков среднего и высокого разрешения Landsat TM/ETM+, Aster, Spot, IRS,

сделанных в период с 1995 по 2011 г. 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, ArcGis 10.3, ArcView-3.3 с модулями Image Analyst, Spatial Analyst. В качестве показателей, с помощью которых осуществлялся мониторинг состояния лесов, были выбраны два инструмента кластерного анализа: классификация ISODATA и тематическая разность пикселей.

В основу инструмента неуправляемой классификации мультиспектральных снимков (классификации «без обучения») заложен метод кластерного анализа ISODATA, который использует установленное число итераций (перегруппировка пикселей по классам) и порог сходимости для выбранных классов. Выбранный метод неуправляемой классификации является самоорганизующимся, так как исследователь указывает только количество классов, на которые нужно разбить весь массив данных [7]. В качестве объектов для анализа выступают пиксели снимков среднего и высокого разрешения, которые соответствуют по шкале биоразнообразия урочищам. При разрешающей способности снимка в 30 м размеры пикселя соответствуют площади 900 м². Каждый пиксель характеризуется своим спектром (в случае снимков Landsat-семь спектральных каналов) и величиной оптической плотности отраженного света, который фиксирует фотокамера спутника. При проведении классификации по методу ISODATA программой в первую очередь учитывается значение оптической плотности и классы формируются в группы по увеличению оптической плотности. Визуально при классификации на два класса в

Таблица 1

Распределение пикселей при проведении классификации и расчете тематической разности фрагмента космического снимка

№ /к-во пикселей	Классификация на 2 класса	Классификация на 6 классов	Тематическая разность результатов классификации на шесть классов	
			1 подкласс	2 подкласс
1	720	260	260	0
2	1070	320	320	0
3		300	160	140
4		420	200	220
5		210	0	210
6		280	0	280
Сумма	1790	1790	940	850

первый класс включены пиксели с малыми значениями оптической плотности (он представлен темным цветом), во второй – пиксели с большими значениями оптической плотности (он представлен белым цветом). При увеличении количества классов появляются классы с промежуточными значениями оптической плотности, но при этом сохраняется симметрия распределения пикселей.

Затем результаты классификации обрабатываем с помощью инструмента – тематическая разность. Инструмент тематической разницы позволяет перераспределить пиксели одного результата классификации относительно другого результата классификации, с которым проводят сравнение. Например, проводим классификацию одного и того же фрагмента снимка на два и шесть классов. А затем вычисляем тематическую разницу между результатами классификации (шесть классов относительно двух классов) (табл.1). При этом после определения тематической разности пиксели с малыми значениями оптической плотности отраженного света распределяются в 1-м подклассе тематической разности (что соответствует древостою покрытой лесом территории, сосредоточенной в первом классе результатов классификации ISO-DATA на два класса).

Во 2-м подклассе тематической разности сосредоточены пиксели с большой оптической плотностью (что соответствует территории с большой долей открытых пространств, в том числе каменными осыпями и гольцами, лугами, ерниковыми зарослями, пустошами и редколесьем). В приведенном примере (табл.1) при расчете тематической разности в 1-м подклассе представлены участки, покрытые лесом (260 и 320 пикселей, как в результатах классификации на 6 классов или 720 пикселей в результатах классификации на 2 класса), но появились еще 2 класса (160 и 200 пикселей), в которых есть деревья и окна между ними, но преобладают деревья. Во 2-м подклассе тематической разности имеются участки только с открытыми пространствами (210 и 280 пикселей, так же как и в результатах классификации на 6 классов), но появились еще два промежуточных класса (140 и 220 пикселей), в которых хотя и преобладают открытые пространства, но имеются и деревья (это редколесье).

Кроме того, для проведения анализа симметрии распределения пикселей при изменении площади и сезонных изменений использовались серии фрагментов космических снимков с разной площадью. Сохранялись фрагменты по размеру экрана дисплея с разным масштабом – 1:15, 1:16, 1:17, 1:18, 1:20. Каждый шаг по увеличению на единицу масштаба соответствовал увеличению площади территории, представленной на экране на 2025 пикселей или на 182 га (рис.1). Ниже представлены результаты совместного применения двух инструментов кластерного анализа пикселей в разных направлениях мониторинга состояния лесов.

Результаты и обсуждение

1. *Оценка нарушенности лесных экосистем после проведения кластерного анализа.* После пожара распределение древостоя по классам классификации нарушается в сторону преобладания послепожарных пустошей и редколесий. Поэтому во 2-м подклассе тематической разности отмечено большее количество пикселей. Тогда как ненарушенные экосистемы характеризуются равенством или превышением суммы пикселей 1-го подкласса над суммой пикселей 2-го подкласса результатов классификации (табл.2).

По мере зарастания послепожарных пустошей картина распределения пикселей по подклассам выравнивается и сумма пикселей в 1-м и 2-м подклассах становится одинаковой или отмечается преобладание суммы пикселей в 1-м подклассе над 2-м (табл. 3).

Таблица 2

Показатель тематической разности пикселей при классификации ненарушенных лесов

Ненарушенный лес	Landsat, 1995 г.			Spot, 2007 г.			IRS, 2009 г.		
	6 кл.	10 кл.	18 кл.	6 кл.	10 кл.	18 кл.	6 кл.	10 кл.	18 кл.
Общая Σ пикс.	256956	256956	256956	127049	127049	127049	375512	375512	375512
Σ пикселей 1-го подкласса	147829	140832	143792	68593	64599	67978	222822	219964	220011
Σ пикселей 2-го подкласса	109127	116124	113164	58456	62450	59071	152690	155548	155501

Показатель тематической разности распределения пикселей при классификации нарушенных лесов

Нарушенный лес после пожара 1985 г.	Landsat, 1995 г.			Landsat, 2001 г.			Spot, 2009 г.		
	10 лет после пожара			15 лет после пожара			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.	33104	33104	33104	33104	33104	33104	48405	48405	48405
Σ пикс. 1-го подкласса	15362	15534	15525	15102	15837	16018	24735	24594	24359
Σ пикс. 2-го подкласса	17742	17570	17579	18002	17167	17086	23670	23811	24046

2. Оценка изменений показателя тематической разности пикселей с увеличением площадей фрагментов космического снимка. Для оценки изменений показателя симметрии распределения пикселей с увеличением площадей анализируемых фрагментов были сохранены серии фрагментов космического снимка с возрастающим масштабом – 1:15, 1:16, 1:17, 1:18, 1:20 (рис. 1). После проведения классификации каждого фрагмента и определения тематической разности пикселей были получены кривые роста площадей с малыми значениями оптической плотности (1-й подкласс тематической разности) и участков с большими значениями оптической плотности (с большой долей открытых пространств) – 2-й подкласс тематической разности (рис.2). В случае фрагментов с доминированием лиственных лесов (А) углы наклона кривых одинаковые (кривые практически параллельны). Это говорит о том, что соотношение лесов и участков с большой долей открытых пространств меняется равномерно с ростом анализируемых площадей.

В случае фрагментов с доминированием сосны сибирской (В) характер кривых говорит о том, что при увеличении площадей фрагментов количество покрытых лесом территорий (1-й подкласс тематической разности) увеличивается больше, чем территорий с большой долей открытых пространств (2-й подкласс тематической разности). Кривая, характеризующая покрытые лесом территории, более крутая, чем кривая, характеризующая территории с большой долей открытых пространств.

В случае фрагментов с нарушенными после пожаров лесами при увеличении площадей

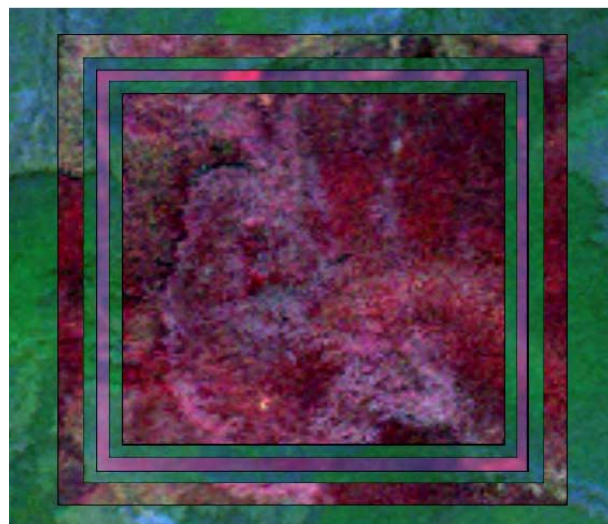


Рис. 1. Изменение масштабов на снимке в диапазоне от 1:15 до 1:20

фрагментов сохраняется преобладание территорий с открытыми пространствами над территориями, покрытыми лесом. Причем кривая, характеризующая площади пустошей и редколесий, более крутая, чем кривая, характеризующая площади, покрытые лесом.

3. Оценка сезонных изменений показателя тематической разности пикселей. При оценке сезонных изменений тематической разности распределения пикселей были использованы серии фрагментов мультиспектральных космических снимков, сделанных летом (июль, август) и осенью (сентябрь, октябрь). Построены кривые сезонного изменения площадей, покрытых древостоем (1-й подкласс тематической разности), и участков с большой долей откры-

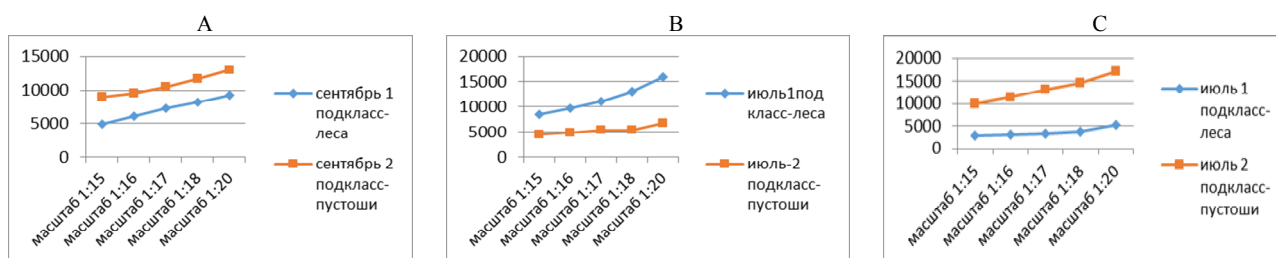


Рис. 2. Кривые зависимости показателя тематической разности пикселей от увеличения площадей фрагментов: А – фрагменты лесов с доминированием лиственницы; В – фрагменты лесов с доминированием сосны сибирской; С – фрагменты нарушенных лесов после пожара

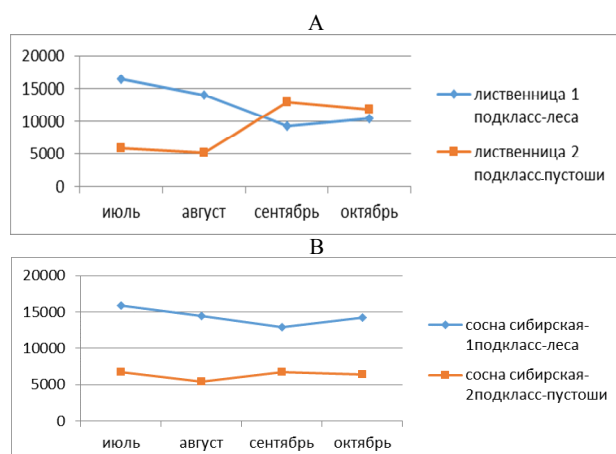


Рис. 3. Сезонные изменения тематической разности распределения пикселей: А – фрагменты с доминированием лиственницы; В – фрагменты с доминированием сосны сибирской

тых пространств (2-й подкласс тематической разности) (рис.3).

Анализ кривых сезонных изменений тематической разности пикселей показал, что кривые изменения покрытых лесом территорий (1-й подкласс тематической разности) резко отличаются от кривых изменения площадей, занятых пикселями с большой долей открытых пространств (2-й подкласс тематической разности) как в случае фрагментов с доминированием лиственницы, так и фрагментов с доминированием сосны сибирской.

Для кривых изменения площадей, покрытых лесом, отмечено некоторое уменьшение количества пикселей с июля по октябрь. Причем в большей мере это характерно для фрагментов с доминированием лиственницы (А), чем для фрагментов с доминированием сосны сибирской (С).

Зато резкое отличие характера кривых изменения площадей выявлено для пикселей с высокой оптической плотностью (2-й подкласс тематической разности). В сентябре, октябре происходит резкое увеличение площадей, занятых открытыми пространствами. Причем эта разница более характерна для фрагментов с доминированием лиственницы (В). Это связано с тем, что в сентябре, октябре происходит листопад и хвоепад и увеличивается доля открытых пространств.

4. Долговременный мониторинг состояния лесов с использованием показателя тематической разности пикселей (на примере процесса восстановления после пожара). С помощью показателя тематической разности пикселей успешно осуществляется долговременный мониторинг процесса восстановления лесов после пожара. Нами была выбрана гарь 1985 г., занимающая территорию 52200 га (рис. 4).

Были использованы летние снимки, сделанные с интервалом в несколько лет. Также проводилась классификация методом ISODATA фрагментов, содержащих площади, нарушенные лесным пожаром с последующим разделением

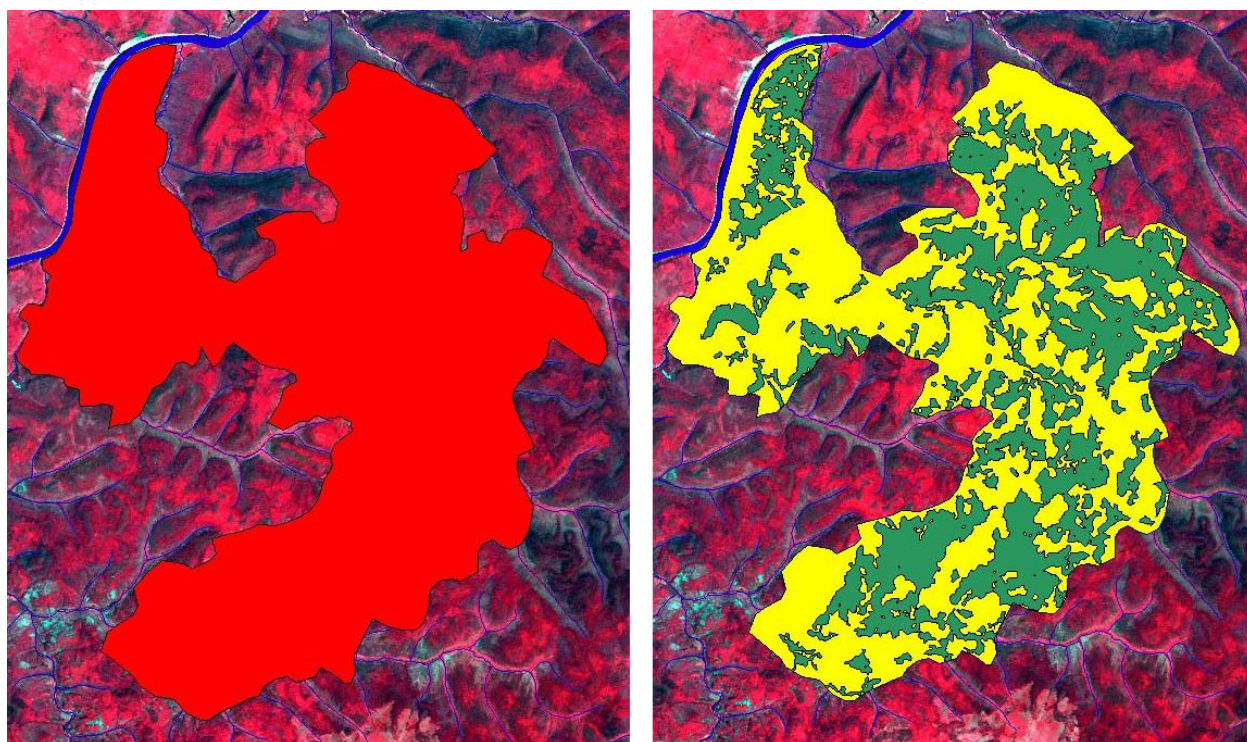


Рис. 4. Границы пожара 1985 г. с послепожарными пустошами: площадь пожара (красный цвет) – 52200 га, площадь послепожарных пустошей (зеленый цвет) – 22500 га (43%); малонарушенные территории (желтый цвет) – 57%

результатов классификации с помощью инструмента тематической разности. 2-й подкласс тематической разности характеризует процесс уменьшения количества послепожарных пустошей и редколесий (уменьшения количества пикселей с большой оптической плотностью отраженного света), 1-й – процесс восстановления лесов (увеличения количества пикселей с малой оптической плотностью). Причем оба процесса дополняют друг друга. Насколько увеличилась площадь лесов на гари, настолько уменьшилась площадь послепожарных пустошей. В табл. 4 приведены результаты оценки процесса восстановления лесов на месте пожара 1985 г. с помощью показателя тематической разности пикселей. Нами была проведена классификация фрагментов космических снимков на 2, 4, 6, 8, 10, 16 классов. Характер кривой восстановления от пожаров не зависит от количества классов. Скорость восстановления лесов на месте фрагмента гари 1985 г. площадью 698 га составила 106,2 га за 10 лет (с 2001 по 2011 г.) или 10,6 га в год.

Процесс восстановления после пожара идет на разных участках гари с разной интенсивностью и зависит от доли послепожарных пустошей (чем больше доля послепожарных пустошей, тем больше масштабы нарушений после пожаров).

Таблица 4

Оценка процесса восстановления лесов после пожара с помощью показателя тематической разности пикселей

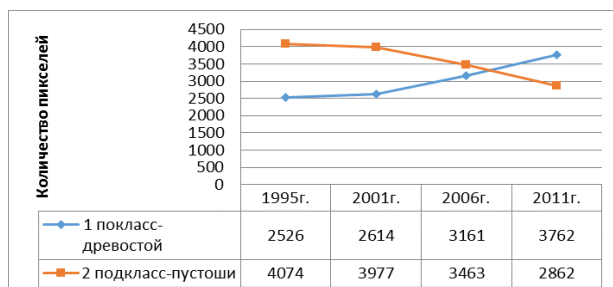
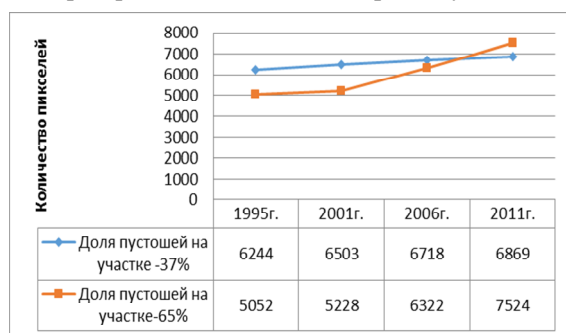


Таблица 5

Оценка процесса восстановления лесов с помощью показателя тематической разности пикселей (1-й подкласс тематической разности – древостой) для фрагментов гари с разной долей послепожарных пустошей



Нами был рассчитан показатель тематической разности пикселей для двух одинаковых фрагментов гари 1985 г., но с разной долей послепожарных пустошей (37%, 65%).

В результате расчета тематической разности пикселей показано, что чем более нарушен участок леса (больше доля послепожарных пустошей), тем более интенсивно идет процесс восстановления лесов от пожара (табл. 5).

Выводы

1. Показана возможность использования показателя тематической разности пикселей при оценке нарушенности лесов от пожаров. После пожара симметрия распределения пикселей по классам нарушается в сторону преобладания пикселей с большой оптической плотностью (большей долей открытых пространств, послепожарных пустошей). Поэтому во 2-м подклассе тематической разности отмечено большее количество пикселей. Тогда как ненарушенные экосистемы характеризуются равенством или превышением суммы пикселей 1-го подкласса тематической разности над суммой пикселей 2-го. По мере зарастания послепожарных пустошей картина распределения пикселей по классам выравнивается и сумма пикселей в двух подклассах тематической разности становится одинаковой или отмечается преобладание суммы пикселей в 1-м подклассе тематической разности.

2. При оценке изменений показателя тематической разности пикселей с изменением площадей покрытых лесом территорий видно, что в случае лиственных лесов соотношение между древостоем и участками с большой долей открытых пространств меняется равномерно с ростом анализируемых площадей. В случае фрагментов с доминированием сосны сибирской показано, что при увеличении площадей фрагментов количество покрытых лесом территорий (1-й подкласс тематической разности) увеличивается больше, чем территорий с большой долей открытых пространств (2-й подкласс тематической разности). Кривая, характеризующая покрытые лесом территории, более крутая, чем кривая, характеризующая территории с большой долей открытых пространств. В случае фрагментов с нарушенными после пожаров лесами при увеличении площадей фрагментов сохраняется преобладание территорий с открытыми пространствами над территориями, покрытыми лесом. Причем кривая, характеризующая площади пустошей и редколесий, более крутая, чем кривая, характеризующая площади, покрытые лесом.

3. При оценке сезонных изменений состояния лесов с помощью показателя тематической раз-

ности пикселей проведено сравнение участков с доминированием лиственницы с участками с доминированием сосны сибирской. Показано, что для участков с доминированием лиственницы в сентябре, октябре происходит резкое изменение показателя тематической разности пикселей за счет увеличения доли пикселей с высокой оптической плотностью. Это связано с процессами хвоепада и листопада и соответственно с увеличением доли открытых пространств и оптической плотности отраженного света. В то время как для участков с доминированием сосны сибирской эти сезонные изменения слабо выражены.

4. Показана перспективность использования показателя тематической разности пикселей в долговременном мониторинге состояния лесов. На примере процесса восстановления лесов от пожара была рассчитана скорость зарастания гари 1985 г. на участке площадью 698 га, которая составила 106,2 га за 10 лет (с 2001 по 2011 г.) или 10,6 га в год.

Также показано, что процесс восстановления после пожара идет на разных участках гари с разной интенсивностью. Чем более нарушен участок леса (больше доля послепожарных пустошей), тем более интенсивно идет процесс восстановления лесов от пожара.

Литература

1. Dash J., Curran P.J. MTCI: The MERIS Terrestrial chlorophyll index // *International Journal of Remote Sensing*. – 2004. – № 25. – P. 5403–5413.

2. Hall R.J., Skakun R.S., Arsenault E.J., Case B.S. Modelling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: application to mapping of aboveground biomass and stand volume // *Forest ecology and management*. – 2006. – №225. – P.378–390.

3. Krankina O.N., Harmon M.E., Cohen W.B., Oetter D.R., Duane M.V. 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., Navarro R., Fernandez P. 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., Morgan P., Bobbitt M.J., Smith M.S., Lewis S.A., Lentile L.B., Robichand P.R., Clark J.T., McKinley R.A. Relationship of multispectral satellite imagery to immediate fire effects // *Journal of Fire ecology*. – 2007. – №3. – P. 64–90.

6. Рожков Ю.Ф., Кондакова М.Ю. Оценка нарушенности лесных экосистем после пожаров с использованием дешифрирования космических снимков // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 9 (часть 9). – С. 2018–2022.

7. *ArcView Image Analysis*. Руководство пользователя. – М.: Дата+, 1998. – 270 с.

Поступила в редакцию 03.05.2016

УДК 630*181.351:581.552

Характеристика лесного покрова западной части Ленского района Республики Саха (Якутия)

И.И. Чикидов

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск

В лесном покрове западной части Ленского района преобладают лиственничники из лиственницы Гмелина и сибирской. Широко представлены бруснично-зеленомошные лиственничники, образующие обширные массивы. Второй по значимости формацией хвойных лесов в районе исследований являются сосновые леса. Сосновые леса занимают верхние части возвышений рельефа. Преобладают сосняки с хорошо развитым моховым покровом. Еловые леса имеют ограниченное распространение. Ограниченное распространение еловых лесов объясняется большей требовательностью ели к плодородию, влажности почвы, к гидротермическому режиму мерзлотных почв. Березняки рассматриваются как часть сукцессионного восстановительного ряда коренных лиственничных и сосновых лесов. Березняки произрастают вдоль пойм ручьев с избыточным увлажнением, на восстанавливающихся гарях и вырубках. Распределение типов и формаций леса по рельефу соответствует требованиям к условиям обеспеченности влагой. Наибольшую опасность для лесного покрова представляет отчуждение лесных территорий под промышленные объекты.

ЧИКИДОВ Иван Иванович – к.б.н., н.с., chikidov@rambler.ru.