

---

---

**RESEARCH ARTICLES**

---

---

**ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ**

---

---

**ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛЕСОВ  
ПОСЛЕ ПОЖАРОВ В ОЛЕКМИНСКОМ ЗАПОВЕДНИКЕ (РОССИЯ)  
ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ LANDSAT****Ю. Ф. Рожков<sup>1</sup>, М. Ю. Кондакова<sup>2</sup>**<sup>1</sup>*Государственный природный заповедник «Олекминский», Россия**e-mail: olektazar-nauka@yandex.ru*<sup>2</sup>*Гидрохимический институт, Россия**e-mail: vesna-dm@mail.ru*

Поступила: 09.07.2018. Исправлена: 07.02.2019. Принята к опубликованию: 21.02.2019.

Использование временных серий космических снимков позволяет проследить динамику процессов лесовосстановления и лесообразования. Проведена оценка использования кластерного анализа распределения пикселей для мониторинга процесса восстановления лесов от пожара. Мультиспектральные космические снимки среднего разрешения Landsat 8, Landsat TM/ETM+, Landsat MSS, сделанные в период с 1973 по 2016 гг. и их фрагменты подвергались обработке с использованием инструментов кластерного анализа: неуправляемой классификации методом ISODATA и тематической разности. Тематическая разность рассчитывалась между результатами классификации на два класса, четыре, шесть, десять классов. Показано, что 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). На сильнонарушенных участках процесс зарастания гари идет с большей интенсивностью, чем на слабонарушенных участках. Рассчитан индекс, характеризующий лесистость участков гари. Показано его увеличение во времени. Рассмотрена взаимосвязь между изменением индекса, характеризующего лесистость во времени и тематической разностью пикселей.

**Ключевые слова:** дешифрирование космических снимков, индекс, характеризующий лесистость, классификация Isodata, тематическая разность, процесс лесовосстановления

**Введение**

В лесах Сибири ежегодно возникает от 4500 до 27 000 пожаров, которые охватывают площадь от 35 000 до 180 000 км<sup>2</sup>. Динамика горимости лесов Сибири за последние годы показывает устойчивую тенденцию роста как числа пожаров, так и площади, пройденной ими (Цветков, Буряк, 2014).

Для разработки теоретических основ таежного лесоводства и оптимального ведения лесного хозяйства большое значение имеют исследования роли пожаров в формировании лесов на крупных таежных территориях. Особенно актуально изучение влияния пожаров на лесообразовательный процесс, лесопожарные эмиссии, баланс углерода (Groisman et al., 2007; Nao et al., 2016; Alexander et al., 2018). В результате многолетних комплексных исследований были определены основные принципы и разработаны методы изучения послепожарного лесообразовательного процесса на ландшафтной основе с использованием аэрокосмических

снимков (Фуряев, 1996). Было проведено моделирование лесообразовательного процесса (Исаев и др., 2005).

Использование временных серий космических снимков позволяет проследить динамику процесса лесовосстановления после пожаров (Жиринов и др., 2004), оценить различные аспекты процесса лесообразования (Жиринов и др., 2013). С использованием разновременных серий космических снимков рассматриваются процессы лесовосстановления после рубок, после пожаров и ветровалов (Шихов и др., 2017), усыхания древостоев (Воробьев и др., 2016). По результатам анализа космических снимков разработаны шкалы нарушенности лесов (Терехин, 2017), дана оценка степени повреждения лесов по средневзвешенной категории состояния и пожароустойчивости (Барталев и др., 2017).

Процессы лесовосстановления оцениваются по динамике изменений спектральной яркости мультиспектральных снимков и индексов (Жиринов и др., 2011; Рожков, Кондакова, 2017),

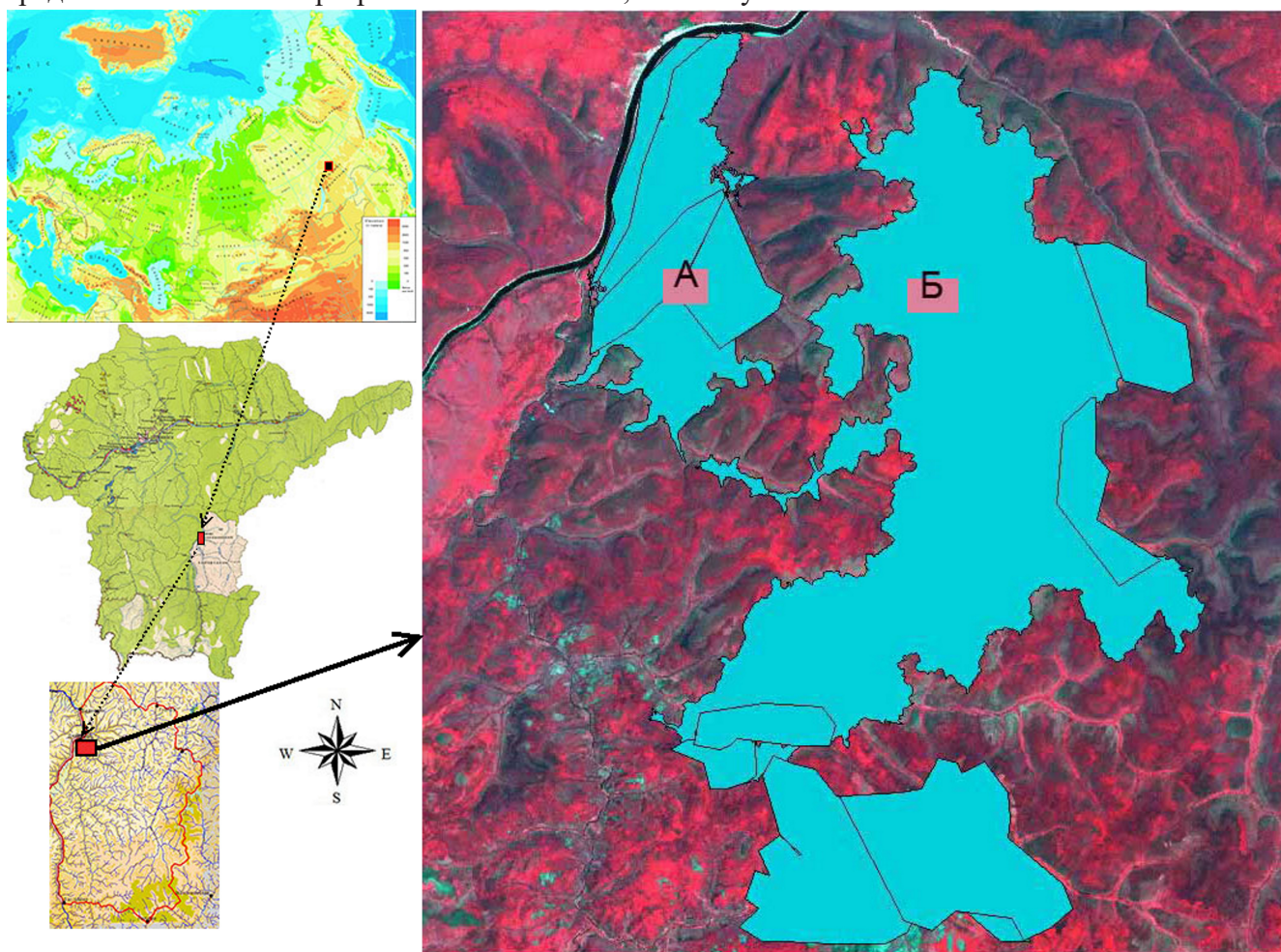
по динамике изменений индекса вегетации NDVI (Воробьев, Курбанов, 2017).

Целью настоящего исследования было сравнение динамики лесовосстановления после пожаров сильнонарушенных и слабонарушенных участков гари с использованием дешифрирования временных серий космических снимков. При выполнении поставленной цели были решены следующие задачи: а) построение кинетических кривых процесса лесовосстановления; б) определение особенностей процесса лесовосстановления на сильно- и слабонарушенных участках гари; в) оценка изменения индекса, характеризующего лесистость и тематической разности пикселей в процессе лесовосстановления.

### Материал и методы

Для осуществления непрерывного мониторинга за состоянием бореальных лесов Олекминского заповедника, имеющего 87.9% общей лесистости, использовалось дешифрирование мультиспектральных космических снимков среднего и высокого разрешения Landsat 8,

Landsat TM/ETM+, Landsat MSS, сделанных в период с 1973 по 2016 гг. Снимки были сделаны во все четыре сезона (летние, осенние, зимние, весенние). При разрешающей способности снимка в 30 м размеры пиксела соответствуют площади 900 м<sup>2</sup>. Все снимки прошли радиометрическую и геометрическую коррекцию. Исследование процесса восстановления лесов после пожара было проведено на разновременных снимках пожара 1985 г., охватившего огромную территорию 522 км<sup>2</sup> (рис. 1). Состав древесных пород на площадях, пройденных пожаром, сравним с составом пород заповедника в целом. Основными лесобразующими породами являются лиственница Гмелина (*Larix gmelinii* Rupr.) и береза плосколистная (*Betula platyphylla* Sukacz.), составляя 56.6%. Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.) составляют 28.9%. Сосна кедровая (*Pinus sibirica* Du Tour), кедровый стланик (*Pinus pumila* (Pall.) Regel), пихта сибирская (*Abies sibirica* Ledeb.) составляют в совокупности 14.5%.



**Рис. 1.** Границы гари 1985 г. с анализируемыми участками на территории Олекминского заповедника: А – сильнонарушенный полигон; В – слабонарушенный полигон.

**Fig. 1.** The boundaries of analysed sites in the Olekminsky State Nature Reserve fire-damaged in 1985: A – severely fire-damaged polygon; B – slightly fire-damaged polygon.

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. Это классификация ISODATA и тематическая разность пикселей. В основу инструмента неуправляемой классификации мультиспектральных снимков 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. Инструмент тематической разности позволяет перераспределить пиксели одного результата классификации относительно другого результата классификации, с которым проводят сравнение (Рожков, Кондакова, 2016).

При проведении неуправляемой классификации по методу ISODATA на два класса мультиспектральных снимков программа разделяет все пиксели по значениям спектральной яркости отраженного света на два диапазона: 0–50% и 50–100%. В 1-й класс попадают пиксели с наименьшими и малыми значениями спектральной яркости. В случае покрытых лесом территорий – это площади с густым древостоем. Во 2-м классе сосредоточены пиксели с высокими значениями спектральной яркости. Это площади с открытыми пространствами, редколесья и пустоши. Классификация на два класса позволяет определить индекс, характеризующий лесистость (Исаев и др., 2009) как отношение площади, покрытой лесной растительностью, к общей площади:  $D = df/S$ , где  $D$  – лесистость;  $df$  – пло-

щадь, покрытая лесной растительностью ( $m^2$ );  $S$  – общая площадь территории ( $m^2$ ). Для установления связи между индексом, характеризующим лесистость и тематической разностью пикселей, была проведена классификация снимков на 2, 4, 6, 10 классов. При расчете тематической разности была определена разность разностей между подклассами тематической разности. При классификации на четыре класса получается пара разностей. Это разность между 1 и 4 рядом тематической разности и разность между 2 и 3 рядом тематической разности. При этом сумма двух разностей равна разности при классификации на два класса. При классификации на шесть классов формируются две пары разности разностей (табл. 1). Первая пара – разность между 1 и 6 рядом тематической разности и между 2–5 рядами тематической разности. Вторая пара – разность между суммой 1, 2 ряда и суммой 5, 6 ряда тематической разности и разность между 3–4 рядом тематической разности. Суммы двух разностей, также как в случае с классификацией на четыре класса равны разности при классификации на два класса. В случае классификации на 10 классов формируются три пары разностей.

Для проведения анализа использовались временные серии фрагментов космических снимков с одинаковой площадью, равной 35.45 км<sup>2</sup> (масштаб 1:10 000). Было проведено сравнение двух участков гари (по летним снимкам Landsat). Это сильнонарушенный, с долей послепожарных пустошей, значительно превышающей долю древостоя (1 класс классификации ISODATA) и слабонарушенный, с долей послепожарных пустошей, немного превышающей долю древостоя в 1995 г. (табл. 2). Кроме того, были проанализированы временные серии весенних снимков Landsat с разными значениями индекса, характеризующего лесистость для сравнения с состоянием лесов до пожара (снимок Landsat май 1973 г.).

**Таблица 1.** Распределение пикселей при проведении классификации и расчете тематической разности фрагмента космического снимка

**Table 1.** Pixel distribution under classifying and calculating the thematic difference for a satellite image fragment

№ класса	Классификация на 2 класса	Классификация на 6 классов	Тематическая разность результатов классификации на 6 классов		Результаты расчета разности разностей подклассов	Количество пикселей при расчете разности
			1 подкласс	2 подкласс		
1	61529	8131	8131	0	2 класса (разность 1 и 2 класса)	32857
2	28672	21994	21994	0	6 классов разность 2–5 ряд	32803
3		21281	21281	0	6 классов разность 1 и 6 ряд	54
4		17118	10123	6995	6 классов сумма разностей 1	32857
5		13600	0	13600	6 классов разность 3–4 ряд	24409
6		8077	0	8077	6 классов разность сумм 1, 2 и 5, 6 ряд	8448
Сумма	90201	90201	61529	28672	6 классов сумма разностей 2	32857

## Результаты и обсуждение

Процесс восстановления после пожара идет на разных участках гари с разной интенсивностью. Он зависит от доли послепожарных пустошей – чем больше доля послепожарных пустошей, тем больше масштабы нарушений после пожаров. В свою очередь, масштабы нарушений зависят от типа пирогенного воздействия. Сильнонарушенные участки гари находятся там, где прошел низовой пожар высокой интенсивности или верховой пожар. В этом случае выгорает значительная часть древостоя и лесная подстилка. Слабонарушенные участки гари остаются после низового пожара слабой интенсивности. При этом повреждается подстилка леса, но сохраняется древостой.

По мере зарастания гари изменяется индекс, характеризующий лесистость анализируемых участков во времени. Рост индекса у сильнонарушенного полигона более выражен, чем у слабонарушенного (табл. 2).

Восстановление сильнонарушенного и слабонарушенного участков гари проходило по раз-

личным механизмам. Для сильнонарушенного участка гари характерно восстановление леса вокруг очагов лесовозобновления, которые возникли спустя десять лет после пожара (в 1995 г.). В то же время для слабонарушенного участка гари восстановление идет вокруг фрагментов леса, слабо поврежденных пожаром (низовой пожар слабой интенсивности). На рис. 2 и рис. 3 показаны четыре стадии лесовозобновления на сильнонарушенном участке гари. Спустя 10 лет после пожара вдоль ручьев возникают очаги лесовозобновления (рис. 2А), вокруг которых расширяется зона молодой поросли. К 2015 г. (т.е. спустя 30 лет после пожара) практически вся площадь сильнонарушенного участка гари покрыта лесом (рис. 3В).

Иная картина лесовозобновления отмечена на слабонарушенном участке (рис. 4). Площадь фрагментов леса, которые подверглись воздействию низового пожара слабой интенсивности, осталась неизменной спустя 20 лет (рис. 4А) и 30 лет после пожара (рис. 4В). Лесовозобновление идет вокруг этих фрагментов за счет молодой поросли (рис. 4В).

**Таблица 2.** Результаты классификации на два класса сильнонарушенного и слабонарушенного участков гари за период с 1995 по 2015 гг. (летние снимки Landsat)

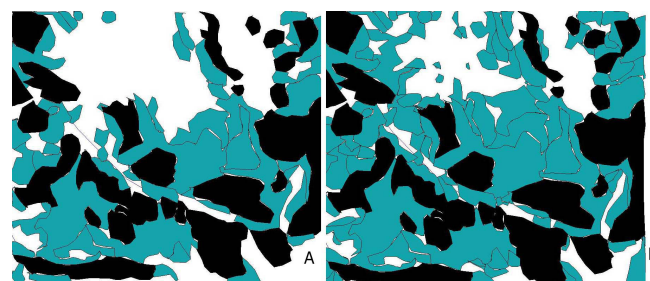
**Table 2.** The classification results for severely fire-damaged sites and slightly fire-damaged sites over the period of 1995–2015 (summer Landsat images)

Показатель	Годы				
	1995 г.	2000 г.	2004 г.	2010 г.	2015 г.
Сильнонарушенный участок					
древостой (пиксели)	2742	3191	3464	3790	4020
пустоши (пиксели)	4111	3258	2986	2660	2430
индекс, характеризующий лесистость	0.40	0.50	0.54	0.59	0.62
Слабонарушенный участок					
древостой (пиксели)	3179	3266	3415	3613	3690
пустоши (пиксели)	3674	3184	3035	2837	2760
индекс, характеризующий лесистость	0.47	0.50	0.53	0.56	0.57



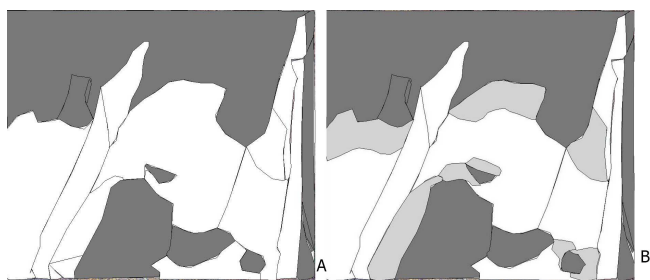
**Рис. 2.** Сильнонарушенный участок гари на снимке Ландсат. Черный цвет обозначает очаги лесовозобновления в 1995 г.; серый цвет – прирост площадей, покрытых лесом. А – очаги зарастания гари в 1995 г.; В – очаги зарастания гари за период с 1995 по 2000 гг.

**Fig. 2.** Severely fire-damaged areas at the Landsat image. Black colour indicates areas of reforestation in 1995; blue colour indicates the increase of areas covered by forest. Designations: A – areas of the post-fire reforestation in 1995; B – areas of the post-fire restoration in 1995–2000.



**Рис. 3.** Сильнонарушенный участок гари. Черный цвет обозначает очаги лесовозобновления в 1995 г.; серый цвет – прирост площадей, покрытых лесом. А – зарастание гари за период с 1995 по 2004 гг.; В – зарастание гари за период с 1995 по 2015 гг.

**Fig. 3.** Severely fire-damaged areas at the Landsat image. Black colour indicates areas of reforestation in 1995; blue colour indicates the increase of areas covered by forest. Designations: A – areas of the post-fire restoration in 1995–2004; B – areas of the post-fire restoration in 1995–2015.



**Рис. 4.** Слабонарушенный участок. Темно-серый цвет обозначает участки, слабо поврежденные пожаром; светло-серый цвет обозначает прирост площадей, покрытых лесом. А – полигон после пожара (снимок Ландсат, 2005 г.); В – полигон после пожара; зарастание гари (снимок Ландсат, 2015 г.).

**Fig. 4.** Slightly fire-damaged areas. Dark-grey colour indicates slightly fire-damaged areas; light-grey colour indicates the increase of areas covered by forest. Designations: A – the post-fire polygon (2005 Landsat image); B – the post-fire polygon. Reforestation of fire-damaged areas (2015 Landsat image).

Сравнение двух участков гари по интенсивности процесса восстановления лесов подтвердило положение о том, что на сильнонарушенных участках процесс зарастания гари идет с большей интенсивностью, чем на слабонарушенных участках (Рожков, Кондакова, 2016).

Ход процесса лесовосстановления является результирующим нескольких, часто разнонаправленных процессов. Наряду с процессом восстановления древостоя, который характеризуется увеличением количества пикселей в первом классе (при классификации на два класса), отмечается процесс уменьшения количества пикселей во втором классе. Последний характеризует уменьшение количества послепожарных пустошей и открытых пространств.

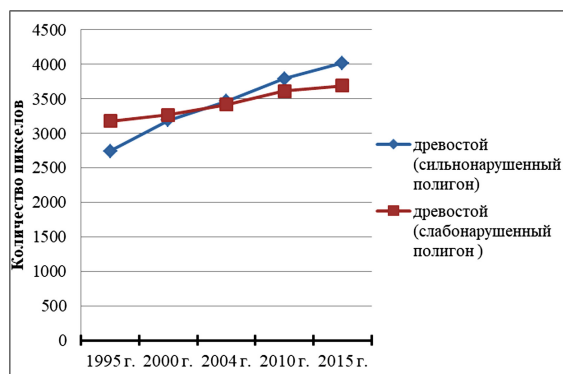
Более того, при рассмотрении динамики процесса уменьшения количества послепожарных пустошей и открытых пространств во временных сериях космических снимков было показано (Рожков, Кондакова, 2017), что при классификации на 10 классов в седьмом и восьмом классах нет уменьшения количества пикселей во времени. Это позволяет предположить, что в седьмой и восьмой классы включены пиксели, отвечающие за территории с большой долей открытых пространств, которые имелись на выбранном фрагменте снимка до пожара. Это пустоши, связанные с естественными особенностями ландшафта. Также отмечено значительное уменьшение количества пикселей в девятом и десятом классах. Именно эти классы харак-

теризуют уменьшение площадей послепожарных пустошей по мере зарастания гари.

Если представить процесс восстановления лесов только как восстановление древостоя, то за период с 1995 по 2015 гг. средняя скорость восстановления составила  $0.0629 \text{ км}^2 / \text{год}$  в случае сильнонарушенных участков гари для полигона площадью  $35.45 \text{ км}^2$  (рис. 5). Для слабонарушенных участков гари средняя скорость восстановления древостоя составила  $0.0260 \text{ км}^2 / \text{год}$  для полигона площадью  $35.45 \text{ км}^2$  (рис. 5).

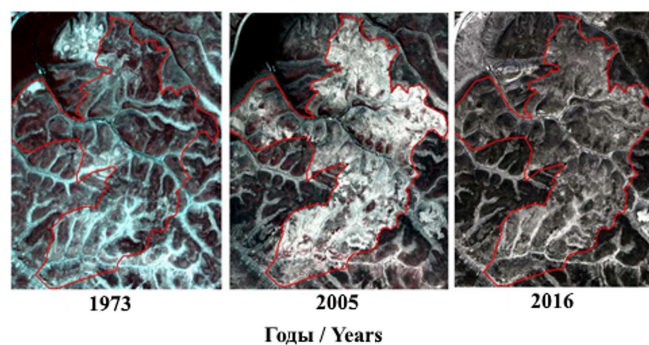
Расчет тематической разности при распределении пикселей по подклассам класса «древостой» показал различие распределения пикселей во времени для слабонарушенных и сильнонарушенных участков гари. Для сильнонарушенного участка гари характерна двухкратная разность между количеством пикселей 1 и 2 подкласса. Для слабонарушенного участка разность между количеством пикселей первого и второго подкласса незначительна. Причем, неоднородность распределения пикселей по значениям спектральной яркости сохраняется на протяжении всего периода наблюдения с 1995 по 2015 гг. А также при расчете тематической разности на 4, 6, 10 подклассов (табл. 3, 4, 5). Причиной подобного различия может быть неравномерное распределение деревьев по возрасту после пожара. Сильнонарушенный участок потерял в результате пожара почти все старовозрастные деревья. Поэтому, пропорция распределения между молодой порослью и старовозрастными деревьями резко изменилась. В первый класс входят преимущественно оставшиеся после пожара старовозрастные деревья, а во второй класс – молодая поросль. В случае слабонарушенного участка (низовой пожар слабой интенсивности) сохранилась пропорция в распределении древостоя по возрастам, которая была до пожара. А прирост за счет молодой поросли происходит вокруг фрагментов, слабо поврежденных пожаром.

Для оценки динамики процесса лесовосстановления были выбраны четыре полигона одинаковой площади, но с разным индексом, характеризующим лесистость. Полигоны выделены на весенних снимках Landsat 2005 г. (наиболее нарушенные леса – спустя 20 лет после пожара); 2009 г., 2016 г. (леса спустя 24 г. и 31 г. после пожара) и 1973 г. (за 12 лет до пожара) (рис. 6).



**Рис. 5.** Сравнение динамики восстановления древостоя сильнонарушенного и слабонарушенного полигонов в Олекминском заповеднике (Площадь полигонов – 35.45 км<sup>2</sup>).

**Fig. 5.** Comparison of the restoration dynamics of the forest stand in the severely fire-damaged polygons and slightly fire-damaged polygons in the Olekminsky State Nature Reserve (polygon’s area is 35.45 km<sup>2</sup>).



**Рис. 6.** Границы пожара 1985 года на весенних снимках: в 1973 г. – за 12 лет до пожара; в 2005 г. – спустя 20 лет после пожара; в 2016 г. – спустя 31 год после пожара.

**Fig. 6.** The boundaries of 1985 wildfire on spring satellite images: in 1973 – 12 years before the wildfire impact; in 2005 – 20 years after the wildfire impact; in 2016 – 31 years after the wildfire impact.

**Таблица 3.** Распределение пикселей во времени для класса «Древостой» при расчете тематической разности на четыре подкласса (полигон площадью 35.45 км<sup>2</sup>)

**Table 3.** The pixel distribution over the time for the «Forest Stand» class to calculate the thematic difference for four subclasses (polygon’s area is 35.45 km<sup>2</sup>)

Год / количество пикселей	Слабонарушенный полигон					Сильнонарушенный полигон				
	1995 г.	2000 г.	2004 г.	2010 г.	2015 г.	1995 г.	2000 г.	2004 г.	2010 г.	2015 г.
1 подкласс	1367	1690	1691	1644	1598	752	802	905	891	899
2 подкласс	1794	1447	1464	1598	1825	1967	2259	2045	2047	2743
3 подкласс	18	129	260	371	269	23	130	514	852	378
4 подкласс	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Сумма	3179	3266	3415	3613	3692	2742	3191	3464	3790	4020

**Таблица 4.** Распределение пикселей во времени класса «Древостой» при расчете тематической разности на шесть подклассов (полигон площадью 35.45 км<sup>2</sup>)

**Table 4.** The pixel distribution over the time for the «Forest Stand» class to calculate the thematic difference for six subclasses (polygon’s area is 35.45 km<sup>2</sup>)

Год / количество пикселей	Слабонарушенный полигон					Сильнонарушенный полигон				
	1995 г.	2000 г.	2004 г.	2010 г.	2015 г.	1995 г.	2000 г.	2004 г.	2010 г.	2015 г.
1 подкласс	1018	1101	1448	1178	1086	470	515	410	608	538
2 подкласс	815	882	826	1338	1133	1146	1266	1297	1375	1591
3 подкласс	1131	1063	776	612	1122	952	1238	1257	1168	1355
4 подкласс	215	220	365	485	351	174	173	500	639	436
5–6 подкласс	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Сумма	3179	3266	3415	3613	3692	2742	3192	3464	3790	4020

**Таблица 5.** Распределение пикселей во времени класса «Древостой» при расчете тематической разности на 10 подклассов (полигон площадью 35.45 км<sup>2</sup>)

**Table 5.** The pixel distribution over the time for the «Forest Stand» class to calculate the thematic difference for ten subclasses (polygon’s area is 35.45 km<sup>2</sup>)

Год / количество пикселей	Слабонарушенный полигон					Сильнонарушенный полигон				
	1995 г.	2000 г.	2004 г.	2010 г.	2015 г.	1995 г.	2000 г.	2004 г.	2010 г.	2015 г.
1 подкласс	572	708	692	632	482	365	273	270	218	205
2 подкласс	666	818	830	842	641	539	656	497	526	580
3 подкласс	739	584	674	700	894	552	422	766	807	850
4 подкласс	578	583	643	706	575	781	565	795	639	924
5 подкласс	489	431	453	300	773	440	691	531	751	787
6 подкласс	135	142	123	433	401	65	585	605	849	674
7–10 подкласс	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Сумма	3179	3266	3415	3613	3692	2742	3192	3464	3790	4020

По мере восстановления лесов после пожара лесистость увеличивалась. Однако, спустя 31 г. после пожара (2016 г.) значения индекса, характеризующего лесистость, не достигли уровня 1973 г. (допожарного) для всех четырех исследуемых полигонов (табл. 6). Если скорость восстановления лесов останется на уровне 2016 г., то индекс, характеризующий лесистость, достигнет «допожарного» уровня в период 2020–2023 гг.

В результате анализа процесса лесовосстановления были установлены следующие закономерности изменения индекса, характеризующего лесистость и разности между классами тематической разности пикселей:

1. Индекс изменяется в широких пределах в диапазоне от 0 до +1. При этом синхронно изменяется показатель тематической разности между 1 и 2 классами при классификации на два класса. От отрицательных значений до 0 при значениях индекса, равных 0.50. Все положительные значения тематической разности отмечены при значениях индекса, характеризующего лесистость выше 0.5 (табл. 7).

2. При восстановлении лесов после пожара увеличивается индекс лесистости во времени и показатель тематической разности между 1 и

2 классами при классификации на два класса. Чем более интенсивно идет процесс зарастания гари, тем более резко увеличивается индекс, характеризующий лесистость и разность между 1 и 2 классами (рис. 7).

3. В случае отрицательных значений разности между классами тематической разности увеличивается разброс между долей смешанных подклассов и долей подклассов с максимальными и минимальными значениями спектральной яркости пикселей при уменьшении индекса, характеризующего лесистость. При этом доля подклассов с минимальными и максимальными значениями спектральной яркости всегда больше доли смешанных подклассов с промежуточными значениями спектральной яркости пикселей (рис. 8).

4. В случае положительных значений разности между классами тематической разности увеличивается разброс между долей смешанных подклассов и долей подклассов с максимальными и минимальными значениями спектральной яркости пикселей с увеличением индекса, характеризующего лесистость (от 0.5 и выше). При этом доля смешанных подклассов всегда больше доли подклассов с минимальными и максимальными значениями спектральной яркости (рис. 8).

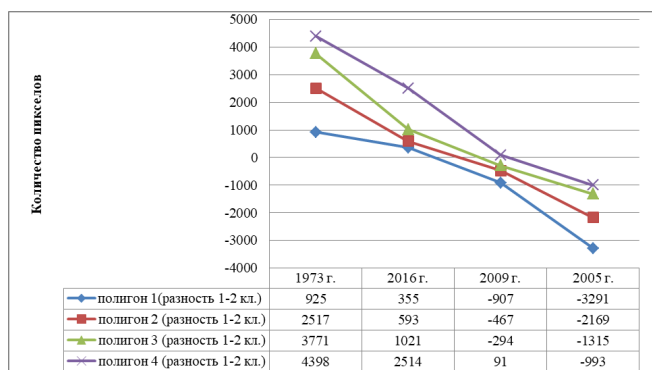
**Таблица 6.** Изменение индекса лесистости в лесных массивах в процессе лесовосстановления после пожара 1985 г.  
**Table 6.** Changes in the index characterising the forest cover during reforestation after the 1985 wildfire

Год	Индекс лесистости			
	Полигон 1	Полигон 2	Полигон 3	Полигон 4
1973	0.57	0.68	0.80	0.84
2005	0.24	0.33	0.40	0.42
2009	0.43	0.46	0.48	0.50
2016	0.53	0.55	0.58	0.69

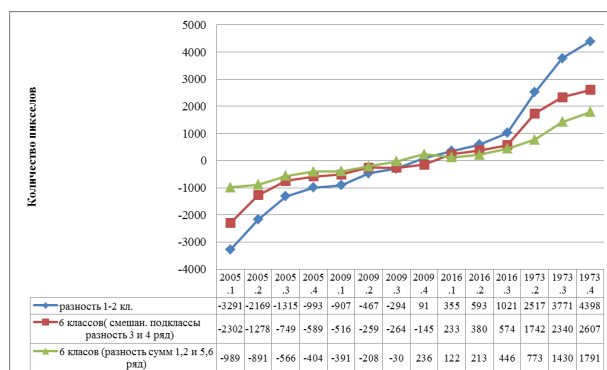
**Таблица 7.** Связь между индексом, характеризующим лесистость и разностью между 1 классом (древостой) и 2 классом (пустоши)

**Table 7.** The relationship between the forest cover index and the difference between class 1 (forest stand) and class 2 (wastelands)

показатель / полигон	2005.1	2005.2	2005.3	2005.4	2009.1	2009.2	2009.3	2009.4	2016.1	2016.2	2016.3	1973.2	1973.3	1973.4
разность 1–2 класс	-3291	-2169	-1315	-993	-907	-467	-294	91	355	593	1021	2517	3771	4398
индекс лесистости	0.24	0.33	0.39	0.42	0.43	0.46	0.48	0.50	0.52	0.55	0.58	0.68	0.79	0.84



**Рис. 7.** Изменение тематической разности по мере лесовосстановления после пожара при классификации на два класса.  
**Fig. 7.** Change of thematic difference during post-fire reforestation by classifying into two classes.



**Рис. 8.** Соотношение между подклассами тематической разности при классификации на шесть классов.  
**Fig. 8.** The ratio between subclasses of thematic difference by classifying into six classes.

### Заключение

В результате проведенных исследований показано, что процесс восстановления после пожара идет на разных участках гари с разной интенсивностью и зависит от доли послепожарных пустошей. Так, чем больше доля послепожарных пустошей, тем больше масштабы нарушений после пожаров. На сильнонарушенных участках процесс зарастания гари идет с большей интенсивностью, чем на слабонарушенных участках.

Восстановление сильнонарушенного и слабонарушенного участков гари идет по различным механизмам. Если для сильнонарушенного участка гари характерно восстановление леса вокруг очагов лесовозобновления, которые возникли спустя десять лет после пожара (в 1995 г.), то для слабонарушенного участка гари восстановление идет вокруг фрагментов леса, слабо поврежденных пожаром.

Ход процесса лесовосстановления является результирующим нескольких, часто разнонаправленных процессов. Если учитывать изменения только в классе «древостой», средняя скорость за период с 1995 по 2015 гг. составила в случае сильнонарушенных участков гари – 0.0629 км<sup>2</sup> / год. Для слабонарушенных участков гари средняя скорость восстановления древостоя составила 0.0260 км<sup>2</sup> / год.

Рассчитан индекс, характеризующий лесистость участков гари. Показано его увеличение во времени. Причем рост индекса у сильнонарушенного полигона более выражен, чем у слабонарушенного. В результате анализа разности между классами тематической разности пикселей и закономерности изменения индекса, характеризующего лесистость, были установлены особенности процесса лесовосстановления в Олекминском заповеднике.

### Литература

Барталев С.А., Стыщенко Ф.В., Хвостиков С.А., Лупян Е.А. 2017. Методология мониторинга и прогнозирования пирогенной гибели лесов на основе данных спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 14(6). С. 176–193.

Воробьев О.Н., Курбанов Э.А., Полевщикова Ю.А., Лежнин С.А. 2016. Оценка динамики и нарушенности лесного покрова в Среднем Поволжье по снимкам Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 13(4). С. 124–134.

Воробьев О.Н., Курбанов Э.А. 2017. Дистанционный мониторинг восстановительной динамики растительности на гарях Марийского лесного Заволжья // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 14(2). С. 84–97.

Жиринов В.М., Сухих В.И., Шаталов А.В., Бутусов О.Б., Эйдлина С.П. 2004. Использование космических снимков для изучения динамики зарастания гарей // Исследование Земли из космоса. №5. С. 69–76.

Жиринов В.М., Князева С.В., Эйдлина С.П. 2011. Дистанционное сопровождение лесообразовательного процесса в послерубочных таежных лесах Русской равнины // Лесоведение. №6. С. 29–38.

Жиринов В.М., Князева С.В., Эйдлина С.П. 2013. Экологодинамическое исследование лесообразовательного процесса по космическим снимкам // Лесоведение. №5. С. 76–85.

Исаев А.С., Суховольский В.Г., Хлеборос Р.Г., Бузыкин А.И., Овчинникова Т.М. 2005. Моделирование лесообразовательного процесса: феноменологический подход // Лесоведение. №1. С. 3–11.

Исаев А.С., Князева С.В., Пузаченко М.Ю., Черненко Т.В. 2009. Использование спутниковых данных для мониторинга биоразнообразия лесов // Исследование Земли из космоса. №2. С. 55–66.

Рожков Ю.Ф., Кондакова М.Ю. 2016а. Оценка возможности использования показателя симметрии распределения пикселей в мониторинге состояния лесов при дешифрировании космических снимков среднего и высокого разрешения // Nature Conservation Research. Заповедная наука. Вып. 1(1). С. 98–107. DOI: 10.24189/ncr.2016.008

Рожков Ю.Ф., Кондакова М.Ю. 2016б. Мониторинг состояния лесов с использованием кластерного анализа при дешифрировании космических снимков среднего и высокого разрешения // Наука и образование. №3. С. 95–101.

Рожков Ю.Ф., Кондакова М.Ю. 2017. Оценка процесса восстановления лесов после пожара с использованием кластерного анализа при дешифрировании космических снимков // Вестник Северо-Восточного федерального университета. №2(58). С. 38–49.

Терехин Э.А. 2017. Оценка нарушенности лесных экосистем юго-запада Среднерусской возвышенности с применением материалов космических съемок // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 14(4). С. 112–124.

Цветков П.А., Буряк Л.В. 2014. Исследования природы пожаров в лесах Сибири // Сибирский лесной журнал. №3. С. 25–42.

Фурьяев В.В. 1996. Роль пожаров в процессе лесообразования. Новосибирск: Наука. 253 с.

Шихов А.Н., Перминов С.И., Киселева Е.С. 2017. Оценка подверженности бореальных лесов Урала воздействию лесных пожаров и ветровалов по многолетним рядам спутниковых наблюдений // Со-



временные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 14(4). С. 87–102.

- Alexander H.D., Natali S.M., Loranty M.M., Ludwig S.M., Spektor V.V., Davydov S., Zimov N., Trujillo I., Mack M.C. 2018. Impacts of increased soil burn severity on larch forest regeneration on permafrost soils of far northeastern Siberia // *Forest Ecology and Management*. Vol. 417. P. 144–153. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.03.008
- Groisman P.Ya., Sherstyukov B.G., Razuvaev V.N., Knight R.W., Enloe J.G., Stroumentova N.S., Whitfield P.H., Førland E., Hannsen-Bauer I., Tuomenvirta H., Aleksandersson H., Mescherskaya A.V., Karl T.R. 2007. Potential forest fire danger over Northern Eurasia: Changes during the 20<sup>th</sup> century // *Global and Planetary Change*. 2007. Vol. 56(3–4). P. 371–386. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2006.07.029
- Hao W.M., Petkov A., Nordgren B.L., Corley R.E., Silverstein R.P., Urbanski S.P., Evangeliou N., Balkanski Y., Kinder B.L. 2016. Daily black carbon emissions from fires in northern Eurasia for 2002–2015 // *Geoscientific Model Development*. Vol. 9(12). P. 4461–4474. DOI: 10.5194/gmd-9-4461-2016

## References

- Alexander H.D., Natali S.M., Loranty M.M., Ludwig S.M., Spektor V.V., Davydov S., Zimov N., Trujillo I., Mack M.C. 2018. Impacts of increased soil burn severity on larch forest regeneration on permafrost soils of far northeastern Siberia. *Forest Ecology and Management* 417: 144–153. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.03.008
- Bartalev S.A., Stytsenko F.V., Khvostikov S.A., Lupyán E.A. 2017. Methodology of post-fire tree mortality monitoring and prediction using remote sensing data. *Sovremennye Problemy Distantcionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa* 14(6): 176–193. [In Russian]
- Furyaev V.V. 1996. *The wildfire role in the process of forest formation*. Novosibirsk: Nauka. 253 p. [In Russian]
- Groisman P.Ya., Sherstyukov B.G., Razuvaev V.N., Knight R.W., Enloe J.G., Stroumentova N.S., Whitfield P.H., Førland E., Hannsen-Bauer I., Tuomenvirta H., Aleksandersson H., Mescherskaya A.V., Karl T.R. 2007. Potential forest fire danger over Northern Eurasia: Changes during the 20<sup>th</sup> century. *Global and Planetary Change* 56(3–4): 371–386. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2006.07.029
- Hao W.M., Petkov A., Nordgren B.L., Corley R.E., Silverstein R.P., Urbanski S.P., Evangeliou N., Balkanski Y., Kinder B.L. 2016. Daily black carbon emissions from fires in northern Eurasia for 2002–2015. *Geoscientific Model Development* 9(12): 4461–4474. DOI: 10.5194/gmd-9-4461-2016
- Isaev A.S., Knyazeva S.V., Puzachenko M.Yu., Chernenkova T.V. 2009. Use of satellite data for monitoring of forest biodiversity. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa* 2: 55–66. [In Russian]
- Isaev A.S., Sukhovolsky V.G., Khlebopros R.G., Buzykin A.I., Ovchinnikova T.M. 2005. Modeling of Forest-forming Process: Phenomenological Approach. *Russian Journal of Forest Science* 1: 3–11. [In Russian]
- Rozhkov Yu.F., Kondakova M.Yu. 2016a. Estimates of changes of structural parameters of forest ecosystems in decoding high resolution satellite images. *Nature Conservation Research* 1(1): 98–107. DOI: 10.24189/ncr.2016.008 [In Russian]
- Rozhkov Yu.F., Kondakova M.Yu. 2016b. Monitoring of Forest Condition Using Cluster Analysis in Interpretation Process of Middle and High-Resolutions Satellite Images. *Nauka i Obrazovanie* 3: 95–101. [In Russian]
- Rozhkov Yu.F., Kondakova M.Yu. 2017. Evaluation of Recovery after Forest Fire with Cluster Analysis in Interpretation of Satellite Images. *Vestnik of North-Eastern Federal University* 2(58): 38–49. [In Russian]
- Shikhov A.N., Perminov S.I., Kiseleva E.S. 2017. Assessment of boreal forests vulnerability to fire- and wind-induced disturbances from long-term series of satellite observations within the Urals region. *Sovremennye Problemy Distantcionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa* 14(4): 87–102. [In Russian]
- Terekhin E.A. 2017. Estimation of forest ecosystems disturbance in the southwest of Central Russian Upland using remote sensing data. *Sovremennye Problemy Distantcionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa* 14(4): 112–124. [In Russian]
- Tsvetkov P.A., Buryak L.V. 2014. Studies of Fire Nature in the Forests of Siberia. *Siberian Forest Journal* 3: 25–42. [In Russian]
- Vorobev O.N., Kurbanov E.A. 2017. Remote monitoring of vegetation regeneration dynamics on burnt areas of Mari Zavolzhje forests. *Sovremennye Problemy Distantcionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa* 14(2): 84–97. [In Russian]
- Vorobev O.N., Kurbanov E.A., Polevshikova Yu.A., Lezhnin S.A. 2016. Assessment of dynamics and disturbance of forest cover in the Middle Povolzhje by Landsat images. *Sovremennye Problemy Distantcionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa* 13(4): 124–134. [In Russian]
- Zhirin V.M., Knyazeva S.V., Eidlina S.P. 2011. Remote Maintenance of Forest-Forming Process in Taiga Forests After Their Cutting in the Russian Plain. *Russian Journal of Forest Science* 6: 29–38. [In Russian]
- Zhirin V.M., Knyazeva S.V., Eidlina S.P. 2013. The Ecodynamical Study of Forest-forming Process with Space Imagery. *Russian Journal of Forest Science* 5: 76–85. [In Russian]
- Zhirin V.M., Sukhikh V.I., Shatalov A.V., Butusov O.B., Eidlina S.P. 2004. The use of space images to study the dynamics of the overgrowing of the fires. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa* 5: 69–76. [In Russian]

## ASSESSMENT OF THE POST-FIRE FOREST RESTORATION DYNAMICS IN THE OLEKMINSKY STATE NATURE RESERVE (RUSSIA) ACCORDING TO DATA OF LANDSAT SATELLITE IMAGES

Yuri F. Rozhkov<sup>1</sup>, Maria Yu. Kondakova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*State Nature Reserve «Olekminsky», Russia*

*e-mail: olekmazap-nauka@yandex.ru*

<sup>2</sup>*Hydrochemical Institute, Russia*

*e-mail: vesna-dm@mail.ru*

The use of time series of satellite images allows us to trace the dynamics in the processes of reforestation and forest formation. We estimated the use of the results of cluster analysis of the pixel distribution in the monitoring of post-fire forest restoration. We processed multispectral mid-resolution satellite images (and their fragments) of Landsat 8, Landsat TM/ETM+, Landsat MSS taken in 1973–2016 using the following cluster analysis tools: unmanaged ISODATA classification and thematic difference. The thematic difference was calculated between the results of classifying data into two, four, six, and ten classes. We demonstrated that the post-fire forest restoration takes place in different burned areas with different wildfire intensity. It also depends on the proportion of post-fire wastelands. For example, greater areas of post-fire disturbance have been noted in conditions of a larger proportion of post-fire wastelands. In severely fire-damaged areas, the post-fire vegetation restoration was more intense than in slightly fire-damaged. We calculated the index characterising the forest cover in burned areas. We demonstrated its increase over the time. We considered the relationship between the change in the index characterising the forest cover over the time and the thematic difference of pixels.

**Key words:** index characterising the forest cover, Isodata classification, satellite image interpretation, thematic difference, reforestation process