

*Ю. Ф. Рожков¹, М. Ю. Кондакова²*¹ Государственный заповедник «Олекминский», г. Олекминск, Россия² Гидрохимический институт», г. Ростов-на-Дону, Россия

e-mail: olekmazap-nauka@yandex.ru

e-mail: vesna-dm@mail.ru

ОЦЕНКА ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛЕСОВ ПОСЛЕ ПОЖАРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕГМЕНТАЦИИ И КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА СНИМКОВ LANDSAT

Аннотация. Для целей мониторинга состояния лесных экосистем наиболее эффективно использование возможностей дистанционных методов. На мультиспектральных космических снимках Landsat (временная серия летних снимков за 1995, 2000, 2004, 2008, 2013, 2016 гг.) территории государственного природного заповедника «Олекминский» выделены фрагменты площадью 250 км² (масштаб 1:5000). Затем были сохранены полигоны по трем уровням сегментации – 4, 16, 64 с масштабами, 1:2500, 1:1250, 1:625. При дешифрировании проводилась неуправляемая классификация полигонов методом ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique) на 2, 4, 10 классов. Были построены кривые распределения значений индекса лесистости для полигонов 3 уровня сегментации. Результаты классификации на 4 класса использовались при расчете тематической разности пикселей. По результатам классификации на 4, 10 классов была проведена статобработка с расчетом показателей разности и подобия полигонов – дисперсии генеральной совокупности и теста Фишера (F-тест). Описан способ определения нарушенности экосистем и их восстановления по кривым распределения индекса лесистости. Рассмотрены результаты изменения дисперсии генеральной совокупности и F-теста на разных уровнях сегментации и на разных этапах восстановления лесов. Определены особенности перехода между тремя уровнями самоподобия (скейлинг) мультифрактальных структур по мере восстановления лесов.

Ключевые слова: дешифрирование временной серии космических снимков, классификация Isodata, индекс лесистости, тематическая разность пикселей, дисперсия, F-тест, скейлинг мультифрактальных структур.

*Yu. F. Rozhkov¹, M. Yu. Kondakova²*¹ State Nature Reserve» Olyokminsky «, Olyokminsk, Russia² Hydrochemical Institute, Rostov-on-Don, Russia

e-mail: olekmazap-nauka@yandex.ru

e-mail: vesna-dm@mail.ru

AN ASSESSMENT OF FOREST RESTORATION AFTER FIRE USING SEGMENTATION AND CLUSTER ANALYSIS OF LANDSAT IMAGES

Abstract. For the purposes of monitoring the state of forest ecosystems, it is most effective to use the capabilities of remote methods. Fragments with an area of 250 km² (scale 1:5000) were identified on Landsat multispectral satellite images (time series of summer images for 1995, 2000, 2004, 2008, 2013, 2016) of the Olyokminsky State Nature Reserve. Then polygons were saved at three levels of segmentation: 4, 16, 64 with the scales of 1:2500, 1:1250, 1:625. When deciphering, an unmanaged classification of polygons was carried out using the ISODATA method (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique) into 2, 4, 10 classes. Distribution curves for the values of the forest cover index for polygons of the 3rd level of segmentation were constructed. The results of classification into 4 classes were used to calculate the thematic pixel difference. According to the classification results for 4.10 classes, statistical processing was carried out with the calculation of the difference and similarity indicators of polygons, the dispersion of the general population and the Fisher test (F-test). A method is described for determining the disturbance of ecosystems and their restoration from the distribution curves of the forest cover

index. The results of the change in the dispersion of the general population and the F-test at different levels of segmentation and at different stages of forest restoration are considered. The features of the transition between three levels of self-similarity (scaling) of multifractal structures as forests are restored are determined.

Keywords: satellite image time series interpretation, Isodata classification, forest cover index, thematic pixel difference, F-test, scaling of multifractal structures satellite image interpretation, Isodata classification, forest cover index, dispersion, F-test.

Введение

Для целей мониторинга состояния лесных экосистем наиболее эффективно использование возможностей дистанционных методов. В качестве реперов для оценки сохранности биоразнообразия лесов могут служить такие параметры, как общая лесистость, фрагментация лесного покрова, доля вторичных (мелколиственных) лесов, развитие антропогенной инфраструктуры и доля охраняемых территорий разного подчинения [1, 2]. Дистанционные методы анализа космических снимков используются при определении основных таксационно-дешифровочных показателей [3-6], трехмерном моделировании структуры и динамики таежных ландшафтов [7], почвенно-растительного покрова [8]. Важным методом изучения структуры экосистем на космическом снимке является метод сегментации изображений [9-11]. Он позволяет анализировать мультифрактальную структуру изображений и фрактальное самоподобие (скейлинг) [12, 13]. В качестве инструментов дешифрирования широко распространен кластерный анализ [14, 15].

Целью настоящего исследования является оценка восстановления лесов после пожара с использованием инструментов сегментации и кластерного анализа космических снимков Landsat.

Материалы и методы исследований

При осуществлении непрерывного мониторинга за состоянием бореальных лесов использовалось дешифрирование временной серии летних снимков Landsat, находящихся в свободном доступе на сайте Earth Explorer. Временная серия состояла из четырех летних (июль-август) мультиспектральных снимков (восьмиканальный радиометр ETM+) Landsat7 за 1995, 2000, 2004, 2008 гг. и двух летних (июль) мультиспектральных снимков (десятиканальный сканирующий радиометр OLI) Landsat8 за 2013 и 2016 гг. Для анализа были выбраны полигоны с гарью пожара 1985 года на разных этапах лесовосстановления: 1995, 2000, 2004, 2008, 2013 и 2016 гг. Исследования проводились на территории Олекминского заповедника Юго-Западной Якутии. Для сравнения был выбран исходный полигон площадью 250.0 км² (масштаб 1:5000) с доминированием лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* Rupr.) (рис.1). При проведении сегментации на первом уровне исходный полигон был разбит на четыре полигона масштаба 1:2500. Далее были получены 16 полигонов с масштабом 1:1250. Способ получения полигонов разных масштабов описан ранее [16,17]. На третьем уровне сегментации продолжалось разбиение на тетрады. Получилось 64 полигона масштаба 1:625 и площадью 4.0 км² (рис. 2).

При обработке космических снимков использовался пакет программ ENVI-4.0 (для преобразования снимков в формат Geotif), ArcView-3.3 с модулями Image Analyst, Spatial Analyst (для дешифрирования полученных снимков). В качестве показателя, с помощью которого осуществлялся мониторинг состояния лесов, были выбран инструмент кластерного анализа: классификация ISODATA [18]. Была проведена классификация снимков на 2,4,10 классов. 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 классификации является самоорганизующимся, так как исследователь указывает только количество классов, на которые нужно разбить весь массив данных (в данном случае пикселей). При проведении классификации по методу ISODATA программой в первую очередь учитывается значение спектральной яркости и классы формируются в группы по увеличению спектральной

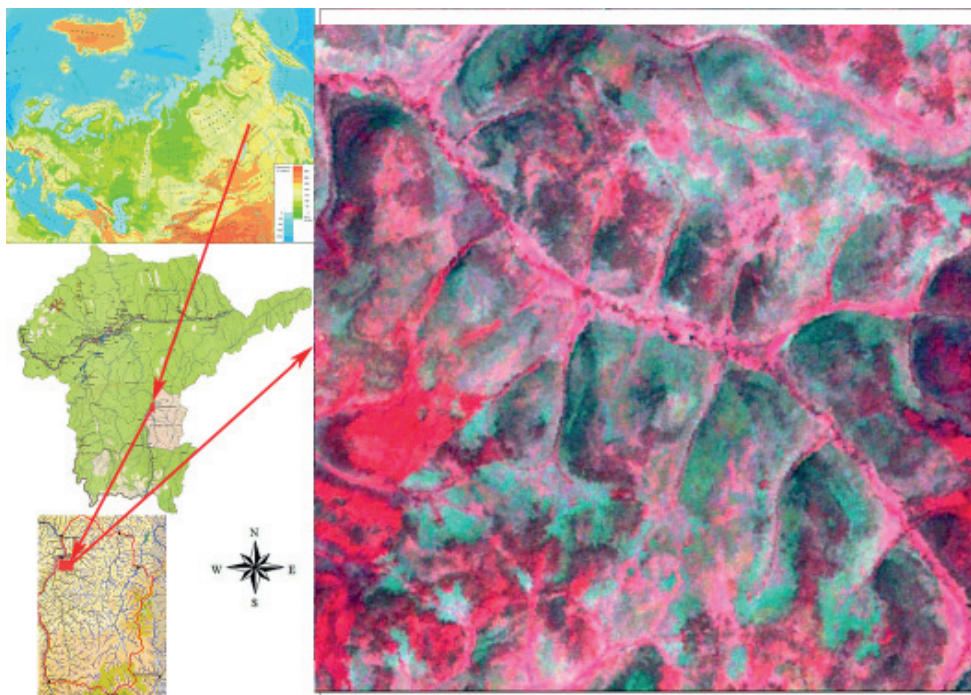


Рис. 1. Район исследования

Fig. 1. Study area

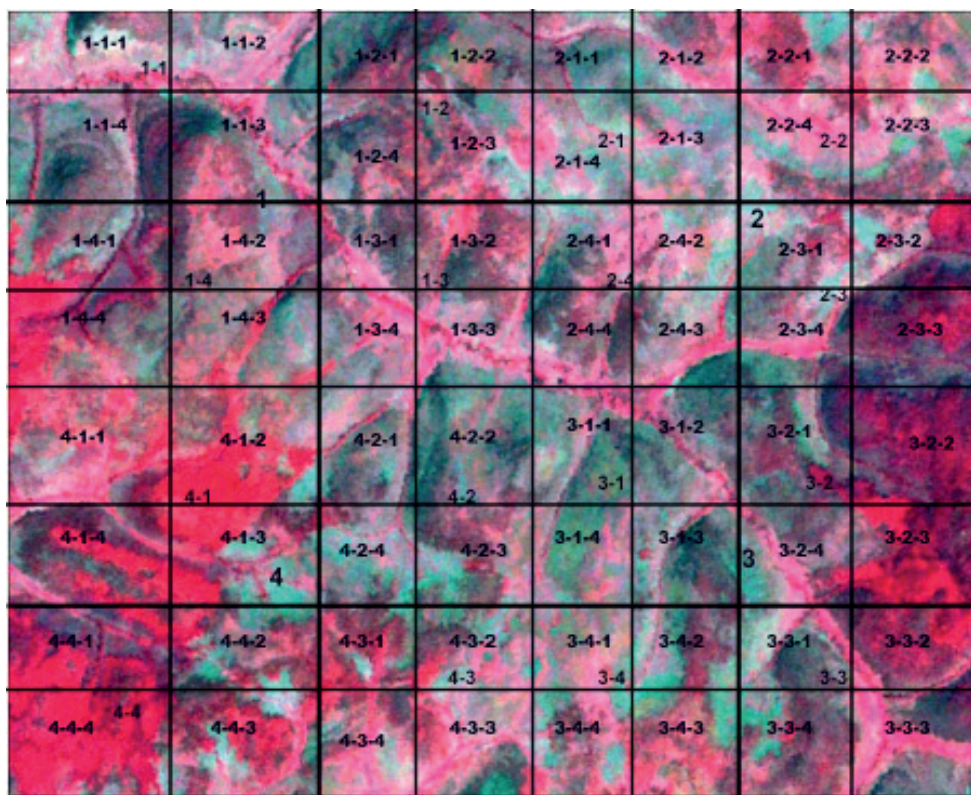


Рис. 2. Разбивка фрагмента снимка Landsat масштаба 1:5000 на полигоны (4, 16, 64 полигона)

Fig. 2. Splitting a fragment of a Landsat image at a scale of 1:5000 into polygons (4, 16, 64 polygons)

яркости. Визуально, при классификации на два класса в первый класс – включены пиксели с малыми значениями спектральной яркости отраженного света (он представлен темным цветом), во второй класс – пиксели с большими значениями спектральной яркости (он представлен белым цветом). При классификации на 2 класса пиксели распределены в соотношении 50 на 50 %.

При увеличении количества классов появляются классы с промежуточными значениями спектральной яркости, но при этом сохраняется симметрия распределения пикселей. Классификация на 4 класса позволяет разделить все пиксели анализируемой площади на 4 группы по возрастанию спектральной яркости с шагом в 25 %. Классификация на 10 классов позволяет распределить все пиксели на 10 групп по возрастанию спектральной яркости с шагом 10 %.

Классификация на два класса позволяет определить индекс, характеризующий лесистость [2], который определяется как отношение площади, покрытой лесной растительностью, к общей площади: $D = df/S$, где: D – лесистость; df – площадь, покрытая лесной растительностью, м²; S – общая площадь территории, м². Классификация на 4, 10 классов была использована при статистическом анализе. Проводилось сравнение полигонов с расчетом их разности и подобия – по дисперсии генеральной совокупности, тесту Фишера (F-тест). До проведения статистического анализа все результаты определения классификации за все годы были пересчитаны и приведены к размерности полигона масштаба 1:1250. Результаты пересчета результатов классификации на всех трех уровнях сегментации представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты пересчета результатов классификации снимка Landsat на 10 классов для разных масштабов

Номер полигона	1=1-2	1=1-3	1=1-4	1=1-1	1-1	25-1	50-1
масштаб	1:625	1:625	1:625	1:625	1:1250	1:2500	1:5000
1 кл.	576	332	683	823	141	198	348
2кл.	1339	1063	452	336	1317	1367	1051
3 кл	887	979	1886	1623	1576	1276	1129
4 кл	1055	1459	1750	560	940	1578	1742
5 кл.	1327	1339	1019	1958	1704	1122	1347
6 кл	1263	1563	1715	1619	1542	1161	1738
7 кл	1327	831	703	811	725	1706	979
8 кл.	935	1874	476	1323	1052	970	871
9 кл	743	803	1447	995	1184	312	679
10 кл.	927	136	248	332	198	690	496
Сумма пикселей	10379	10379	10379	10379	10379	10379	10379

Результаты и обсуждение

Оценка изменений нарушенности лесных экосистем в процессе восстановления от пожаров по кривым распределения индекса лесистости. Ранее нами было показано, что с помощью сегментации [19] можно оценить нарушенность лесных экосистем после разрушительных воздействий (в данном случае, после лесных пожаров).

Ненарушенные экосистемы имеют нормальный характер (гауссова) распределения значений индекса лесистости. Что согласуется с утверждением [20], согласно которому в случае параметрических способов классификации используют закон нормального (гауссова) распределения, типичного для яркостей природных объектов. Тогда как у нарушенных экосистем

закон нормального (гауссова) распределения не действует. На рис.3 показана динамика восстановления лесных экосистем после пожара. Кривые распределения становятся близкими к нормальному по мере восстановления экосистемы после пожара. Спустя 10 и 19 лет после пожара кривые распределения значений индекса лесистости не подчиняются закону нормального распределения (рис. 3 А, В). Через 23 и 31 год после пожара кривые распределения значений индекса лесистости приближаются к кривым нормального(гауссова) распределения (рис. 3 С, D). С помощью тестов на нормальность распределения (R-статистика Shapiro-Wilk normality test) определены следующие значения: 2008 г.- $W=0.88543$, $p\text{-value}=0.2424$; 2013 г.- $W=0.84996$, $p\text{-value}=0.16663$; 2016 г.- $W=0.80276$, $p\text{-value}=0.18007$.

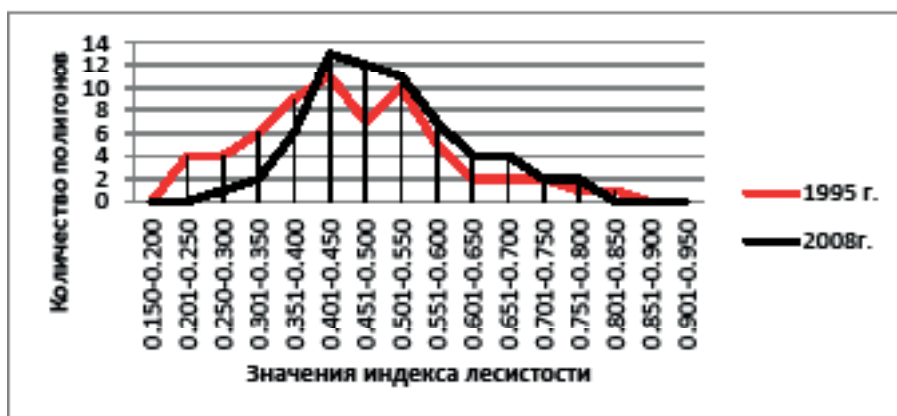
А



В



С



D

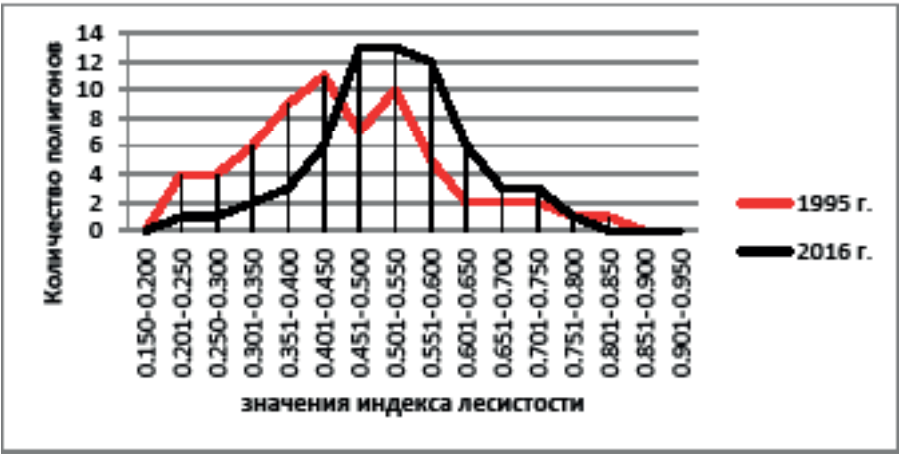


Рис.3. Изменение кривых распределения значений индекса лесистости по мере восстановления лесов после пожара (64 полигона). А- 1995-2000 гг.; В- 1995-2004 гг.; С- 1995-2008 гг.; D- 1995-2016 гг.

Fig.3. Changes in the distribution curves of forest cover index values as forests recover after a fire (64 polygons). A – 1995-2000; B- 1995-2004; C- 1995-2008; D- 1995-2016

Оценка динамики восстановления лесов после пожара с помощью регрессионного анализа. Ранее [18] нами было показано, что наиболее нарушенные после пожара полигоны восстанавливаются с большей интенсивностью, чем слаборазрушенные. Все полигоны, полученные в результате сегментации, были разделены на три группы по значениям индекса лесистости в 1995 году. Сильнонарушенные- со значениями индекса – 0.200-0.350; средненарушенные- 0.350- 0.450; малонарушенные – свыше 0.500. Были рассчитаны средние значения индексов лесистости этих трех групп полигонов по годам (n=7 в каждой группе). Распределение значений индексов лесистости показано в таблице 2.

Таблица 2 – Связь между индексом лесистости и интенсивностью восстановления лесов

Год	Сильнонарушенные (badly disturbed)	Средненарушенные (moterately disturbed)	Малонарушенные (little disturbed)
1995	0.257	0.383	0.565
2000	0.311	0.441	0.602
2004	0.365	0.460	0.604
2008	0.419	0.520	0.607
2013	0.442	0.521	0.619
2016	0.459	0.534	0.628

Были определены коэффициенты трех уравнений линейной регрессии для сильно-, средне-, малонарушенных полигонов. Уравнения регрессии выглядят следующим образом:

Сильнонарушенные полигоны – $Y = 0.009869 \cdot X - 4.22570$,
Средненарушенные полигоны – $Y = 0.007035 \cdot X - 3.635774$,
Малонарушенные полигоны – $Y = 0.00214 \cdot X - 3.68893$.

Исходя из значений коэффициентов уравнений, можно сделать вывод, что сильнонарушенные полигоны восстанавливаются в 4.6 раз интенсивнее, чем малоонарушенные.

Анализ межгодовой динамики соотношения площадей, покрытых лесом территорий и послепожарных пустошей показал, что до 2004 года преобладали площади, занятые послепожарными пустошами, а с 2008 года отмечено преобладание покрытых лесом площадей (рис. 4).

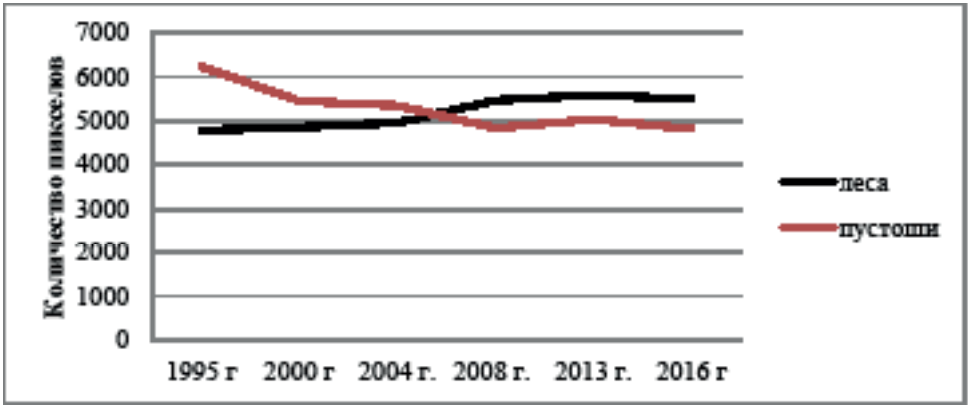


Рис. 4. Изменение соотношения между покрытой лесом территорией и послепожарными пустошами по мере восстановления после пожара за период с 1995 по 2016 гг.

Fig. 4. Change in the ratio between forested area and post-fire wasteland as post-fire recovery progressed from 1995 to 2016

Такая же картина наблюдается при сравнении результатов определения индекса лесистости полигонов второго уровня сегментации (16 полигонов) (табл. 3). До 2004 года преобладали полигоны с доминированием послепожарных пустошей (значения индекса менее 0.500), тогда как после 2008 года преобладали покрытые лесом территории.

Таблица 3 – Межгодовая динамика индекса лесистости полигонов второго уровня сегментации (16 полигонов)

Год/полигоны	индекс лесистости до 0.500	индекс лесистости более 0.500
1995 г.	12	4
2000 г.	9	7
2004 г.	9	7
2008 г.	7	9
2013 г.	6	10
2016 г.	4	12

Сравнение полигонов первого уровня сегментации показало, что из четырех полигонов наиболее нарушен полигон 2, а наименее нарушен полигон 4. По значениям индекса лесистости полигон 4 весь исследуемый период имел значения индекса лесистости более 0.500, что говорит о преобладании покрытой лесом территории над нарушенной после пожара (табл. 4). Тогда как, для полигона 2 в течение всего исследуемого периода характерны значения индекса лесистости менее 0.500, что говорит о преобладании площадей послепожарных пустошей.

Таблица 4 – Межгодовая динамика индекса лесистости полигонов первого уровня сегментации

Год/полигон	1995 г.	2000 г.	2004 г.	2008 г.	2013 г.	2016 г.
полигон 1	0.434	0.462	0.472	0.522	0.524	0.525
полигон 2	0.359	0.368	0.392	0.449	0.453	0.474
полигон 3	0.403	0.447	0.465	0.526	0.533	0.565
полигон 4	0.526	0.549	0.553	0.564	0.582	0.588

Сравнение полигонов лесного массива с помощью статистических методов. Каждый полигон тетрады с масштабом 1:625, 1:1250, 1:2500, 1:5000 подвергался обработке с определением дисперсии генеральной совокупности и F-теста на подобие. Проводилось определение статистических характеристик каждого полигона по уровням сегментации. Каждый полигон масштаба 1:625 последовательно сравнивался с полигонами масштаба 1:1250, 1:2500 и исходным полигоном масштаба 1:5000. Сравнение изменений значений дисперсии результатов классификации полигонов по мере восстановления лесов после пожара показало, что дисперсия увеличивается во времени. В случае исходных полигонов масштаба 1:5000 при классификации на четыре класса за период с 1995 г. по 2016 г. увеличение более чем в 4 раза (с 93121 до 484051), при классификации на 10 классов увеличение также почти в 4 раза (с 45614 до 153027). (табл. 5). При проведении сегментации исходных полигонов на тетрады, тенденция увеличения дисперсии полигонов во времени сохраняется для каждого из полигонов первой тетрады.

Кроме того, сравнение значений дисперсии результатов классификации на четыре и десять классов показало, что дисперсия для четырех классов классификации не менее чем в 2-4 раза превышает дисперсию при классификации этих же полигонов на десять классов.

Объяснением подобного изменения дисперсии во времени может быть увеличение разнообразия биотопов по мере восстановления от пожара за счет зарастания послепожарных пустошей. Происходит возобновление лесов, увеличение доли вторичных лесов, увеличение доли молодняка и кустарников и др.

Таблица 5 – Изменения дисперсии при классификации на 4 и 10 классов по мере восстановления лесов

Год/полигон	1995 г.	2008 г.	2016 г.	1995 г.	2004 г.	2008 г.	2013 г.	2016 г.
	Исходные полигоны, 4 класса			Исходные полигоны, 10 классов				
50-1	93121	470014	484051	45614	42847	53253	66112	153027
	Первый уровень сегментации, 4 класса			Первый уровень сегментации, 10 классов				
1	241045	449052	611558	54446	63959	136892	143962	185638
2	371049	392318	480861	49394	51169	81260	85385	90565
3	158491	164856	312093	58453	61752	63160	66591	72335
4	84450	397072	606440	47706	62292	77990	104435	140851

Оценка изменений мультифрактальной структуры в процессе восстановления лесов от пожара. В работах Б.Б. Мандельброта [21, 22] рассматривается фрактальная структура организации как самих растений, так и растительных сообществ основанная на принципе самоподобия. Ранее [17] нами было показано, что сегментация на четыре уровня структурной организации (когда исходный полигон с помощью сегментации был разделен на 4, 16, 64, 256 фрагментов) позволяет определить фрактальное самоподобие (скейлинг) – повторение фракталом самого себя на разных масштабных уровнях. Переходы между уровнями самоподобия можно оценить с помощью дисперсии, вернее разности дисперсий разных уровней. Были сформулированы четыре правила перехода между уровнями самоподобия. В настоящем исследовании сравниваются переходы между тремя уровнями самоподобия (когда исходный полигон сегментируется на 4, 16, 64 фрагмента) по мере восстановления лесов после пожара. В качестве показателя для сравнения переходов между уровнями самоподобия в разные годы может служить частное от деления дисперсии исходного полигона на дисперсии полигонов всех уровней сегментации и на разность дисперсий (табл. 6, 7, 8, 9). Были построены кривые распределения частных от деления дисперсии исходного полигона и дисперсий полигонов 3 уровня сегментации (64 полигона) по годам. Сравнивались кривые распределения для 1995, 2008, 2016 гг.

(рис. 5, 6). По характеру кривых распределения видно, что по мере восстановления лесов сужается диапазон дисперсий (и соответственно, частных от деления дисперсий). Если в 1995 году диапазон частных от деления дисперсий занимал всю шкалу значений (рис. 5) от 0 до 5.0, то в 2008 году он сужался до 4.0, а в 2016 году занимал диапазон от 0 до 1.5. При классификации на 4 класса (рис. 6) в 1995 году вообще отсутствует какая-либо упорядоченность в распределении значений дисперсий по всей шкале от 0 до 13.0. В 2008 и 2016 гг. упорядоченность в распределении дисперсий появляется и отмечается также сужение диапазона в 2016 году, в сравнении с 2008 годом. От 3.5 до 2.5.

Таблица 6 – Сравнение дисперсий и разности дисперсий третьего уровня сегментации полигона 1 в 2016 году

№ полигона	дисперсия	дисперсия с полигоном 1-1,1-2,1-3, 1-4	разность дисперсий	дисперсия с полигоном 1	разность дисперсий	дисперсия с исходным полигоном
1=1-1	249657	254098	-2701	256799	58796	198003
1=1=2	105165	181851	-2701	184553	58796	125757
1=1=3	151540	205039	-2701	207740	58796	148944
1=1=4	159808	209173	-2701	211874	58796	153078
1=2-1	290770	272778	-4577	277355	58796	218559
1=2-2	140209	197497	-4577	202074	58796	143279
1=2-3	89727	172256	-4577	176833	58796	118037
1=2-4	178982	216884	-4577	221461	58796	162665
1=3-1	267219	249288	-16291	265579	58796	206784
1=3-2	260925	246141	-16291	262432	58796	203637
1=3-3	166615	198986	-16291	215278	58796	156482
1=3-4	122676	177017	-16291	193308	58796	134512
1=4-1	194750	189750	-39595	229345	58796	170549
1=4-2	60151	122451	-39595	162046	58796	103250
1=4-3	119259	152004	-39595	191599	58796	132803
1=4-4	194788	189769	-39595	229364	58796	170568

Таблица 7 – Частное от деления дисперсии исходного полигона и дисперсий и разности дисперсий третьего уровня сегментации полигона 1 в 2016 году

№ полигона	дисперсия	дисперсия полигонов 1-1,1-2,1-3, 1-4	разность дисперсий	дисперсия с полигоном 1	разность дисперсий	дисперсия с исходным полигоном
1=1-1	1.71	1.73	-0.02	1.75	0.40	1.35
1=1=2	0.72	1.24	-0.02	1.26	0.40	0.85
1=1=3	1.04	1.40	-0.02	1.41	0.40	1.02
1=1=4	1.09	1.42	-0.02	1.45	0.40	1.05
1=2-1	1.99	1.86	-0.03	1.89	0.40	1.49
1=2-2	0.96	1.35	-0.03	1.38	0.40	0.98
1=2-3	0.61	1.17	-0.03	1.21	0.40	0.81
1=2-4	1.22	1.48	-0.03	1.51	0.40	1.11
1=3-1	1.82	1.70	-0.11	1.81	0.40	1.41
1=3-2	1.78	1.68	-0.11	1.79	0.40	1.39
1=3-3	1.13	1.36	-0.11	1.47	0.40	1.07
1=3-4	0.83	1.21	-0.11	1.32	0.40	0.92
1=4-1	1.33	1.30	-0.27	1.57	0.40	1.17
1=4-2	0.41	0.84	-0.27	1.11	0.40	0.71
1=4-3	0.81	1.03	-0.27	1.31	0.40	0.92
1=4-4	1.33	1.29	-0.27	1.57	0.40	1.17

Таблица 8 – Сравнение дисперсий и разности дисперсий третьего уровня сегментации полигона 1 в 1995 году

№ полигона	дисперсия	дисперсия с полигонами 1-1,1-2,1-3, 1-4	разность дисперсий	дисперсия с полигоном 1	разность дисперсий	дисперсия с исходным полигоном
1=1-1	145045	134215	34470	99745	4416	95329
1=1=2	155249	139317	34470	104847	4416	100431
1=1=3	114766	119076	34470	84606	4416	80190
1=1=4	172601	147993	34470	113523	4416	109107
1=2-1	41954	60521	12321	48200	4416	43784
1=2-2	114396	96742	12321	84421	4416	80005
1=2-3	81839	80464	12321	68143	4416	63727
1=2-4	272138	175613	12321	163292	4416	158876
1=3-1	125215	131749	41918	89830	4416	85414
1=3-2	146584	142433	41918	100515	4416	96099
1=3-3	192349	165316	41918	123397	4416	118981
1=3-4	148166	143224	41918	101306	4416	96890
1=4-1	132105	121786	28511	93275	4416	88859
1=4-2	164371	137919	28511	109408	4416	104992
1=4-3	233655	172561	28511	144051	4416	139635
1=4-4	131239	121353	28511	92842	4416	88426

Таблица 9 – Частное от деления дисперсии исходного полигона и дисперсий и разности дисперсий третьего уровня сегментации полигона 1 в 1995 году

№ полигона	дисперсия	дисперсия с полигонами 1-1, 1-2,1-3, 1-4	разность дисперсий	дисперсия с полигоном 1	разность дисперсий	дисперсия с исходным полигоном
1=1-1	3.18	2.94	0.76	2.19	0.10	2.09
1=1=2	3.40	3.05	0.76	2.30	0.10	2.20
1=1=3	2.52	2.61	0.76	1.85	0.10	1.76
1=1=4	3.78	3.24	0.76	2.49	0.10	2.39
1=2-1	0.92	1.33	0.27	1.06	0.10	0.96
1=2-2	2.51	2.12	0.27	1.85	0.10	1.75
1=2-3	1.79	1.76	0.27	1.49	0.10	1.39
1=2-4	5.97	3.85	0.27	3.58	0.10	3.48
1=3-1	2.75	2.89	0.92	1.97	0.10	1.87
1=3-2	3.21	3.12	0.92	2.20	0.10	2.11
1=3-3	4.22	3.62	0.92	2.71	0.10	2.61
1=3-4	3.25	3.14	0.92	2.22	0.10	2.12
1=4-1	2.89	2.67	0.63	2.04	0.10	1.95
1=4-2	3.60	3.02	0.63	2.39	0.10	2.30
1=4-3	5.12	3.78	0.63	3.16	0.10	3.06
1=4-4	2.87	2.66	0.63	2.03	0.10	1.94

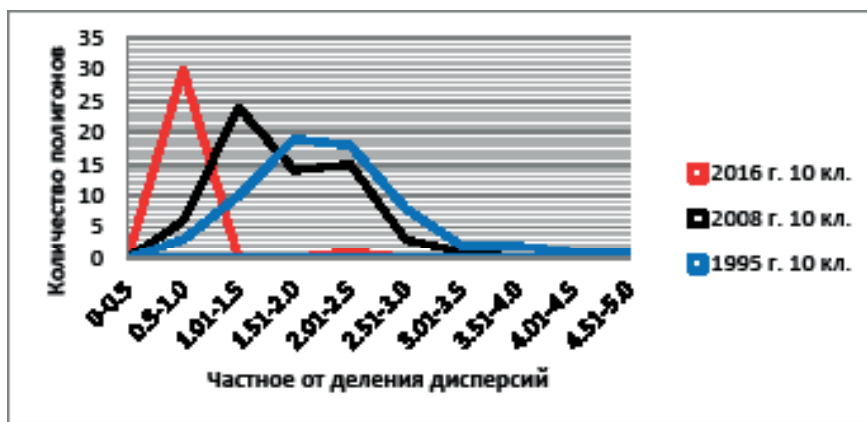


Рис. 5. Кривые распределения частного от деления дисперсий по мере восстановления лесов от пожара (при классификации на 10 классов)

Fig. 5. Distribution curves of the quotient of division of variances as forests recover from fire (when classified into 10 classes)

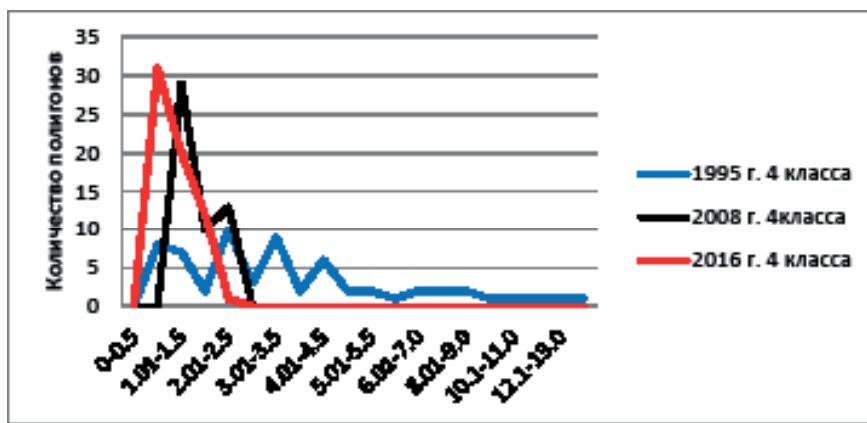


Рис. 6. Кривые распределения частного от деления дисперсий по мере восстановления лесов от пожара (при классификации на 4 класса)

Fig. 6. Distribution curves of the quotient of division of variances as forests recover from fire (when classified into 4 classes)

Изменения подобия полигонов по мере восстановления лесов от пожара. Ранее [23] определение F-теста массивов данных позволило оценить, насколько похожи исследуемые лесные массивы. Если для однородного лесного массива все значения F-теста выше 0.90, а для некоторых полигонов он выше 0.99 (полное подобие равно 1.0), то для неоднородного лесного массива значения F-теста изменялись в широком диапазоне от 0.55 до 0.94. В настоящем исследовании параллельно с определением дисперсии также проводилась оценка изменения F-теста на подобие полигонов по мере восстановления лесов. Причем сравнивались результаты классификации полигонов на 4 и 10 классов для всего выбранного временного диапазона (с 1995 по 2016 гг.).

Определялось подобие каждого полигона третьего уровня сегментации исходному полигону. Были построены кривые распределения значений F-теста для каждого года (рис. 7, 8). В результате выяснилось, что по мере восстановления лесов увеличивается доля полигонов подобных исходному полигону (табл. 10). При классификации на 4 и 10 классов в 1995 году большая часть полигонов отличается от исходного полигона и расположена в диапазоне значений F-теста на подобие от 0 до 0.3. В 2016 году доля полигонов со значениями F-теста выше

0.5 в 2 раза больше полигонов с низким подобием при классификации на 4 класса и почти в 1.5 раза больше при классификации на 10 классов. При классификации на 10 классов в 2016 г. распределение значений F-теста становится более равномерным для всего диапазона (рис. 7).

Таблица 10 – Межгодовые изменения подобия полигонов 3 уровня сегментации (64 полигона) исходному полигону по мере восстановления лесов от пожара

Год/ количество полигонов	подобие для 4 классов		подобие для 10 классов	
	до 0.5	выше 0.5	до 0.5	выше 0.5
1995 г.	52	12	55	9
2008 г.	22	42	47	17
2016 г.	20	44	26	38

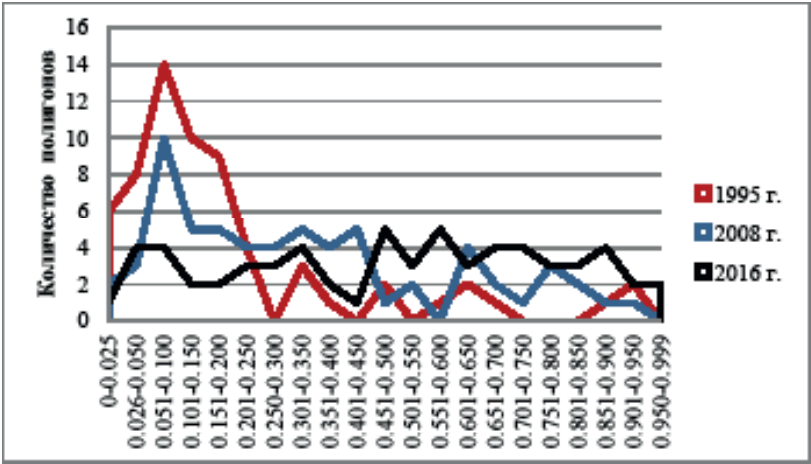


Рис. 7. Межгодовые изменения подобия полигонов 3 уровня (64 полигона) сегментации исходному полигону по мере восстановления лесов от пожара (при классификации на 10 классов)

Fig. 7. Interannual changes in the similarity of polygons of the 3rd level (64 polygons) of segmentation to the original polygon as forests recover from fire (when classified into 10 classes)

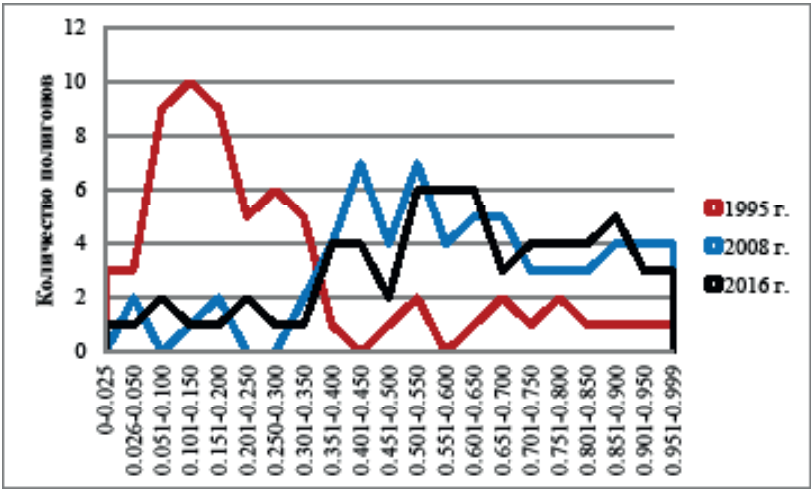


Рис. 8. Межгодовые изменения подобия полигонов 3 уровня (64 полигона) сегментации исходному полигону по мере восстановления лесов от пожара (при классификации на 4 класса)

Fig. 8. Interannual changes in the similarity of polygons of the 3rd level (64 polygons) of segmentation to the original polygon as forests recover from fire (when classified into 4 classes)

Заключение

В результате использования сегментации и кластерного анализа в дешифрировании временной серии снимков Landsat лесных экосистем Олекминского заповедника дана оценка процесса лесовосстановления после пожара 1985 года за период с 1995 по 2016 гг. Были выбраны исходные полигоны с доминированием лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii Rupr.*) площадью 250 км² (масштаб 1:5000). Затем были сохранены полигоны по трем уровням сегментации- 4, 16, 64 с масштабами 1:2500, 1:1250, 1:675. При дешифрировании проводилась неуправляемая классификации полигонов методом ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique) на 2, 4, 10 классов. Результаты классификации на 2, 4 класса использовались при расчете тематической разности пикселей и индекса, характеризующего лесистость.

Описан способ определения нарушенности экосистем и их восстановления по кривым распределения индекса лесистости. Были построены кривые распределения значений индекса лесистости для полигонов 3 уровня сегментации (64 полигона). У нарушенных экосистем закон нормального (гауссова) распределения значений не действует. Кривые распределения становятся близкими к нормальному по мере восстановления экосистемы после пожара. Шапиро-тест на нормальность распределения показал значение p -value для 2013 года = 0.16663, для 2016 года = 0.18007.

При оценке динамики лесовосстановления было показано, что наиболее нарушенные после пожара полигоны восстанавливаются с большей интенсивностью, чем слабонарушенные. За период с 1995 по 2016 гг. у малонарушенных полигонов восстанавливается в 4.6 раза меньшая площадь, чем у сильнонарушенных. Начиная с 2008 года площадь, покрытая лесом, начинает превышать площадь послепожарных пустошей.

По результатам классификации на 4, 10 классов была проведена статобработка с расчетом показателей разности и подобия полигонов – дисперсии генеральной совокупности и теста Фишера (F-тест). Каждый полигон тетрады с масштабами 1:625, 1:1250, 1:2500 подвергался статистической обработке с определением показателей разности и подобия полигонов – дисперсии генеральной совокупности и F-теста на подобие. Определялось, насколько полигоны похожи с исходным полигоном, между собой в тетраде и с полигонами второго, третьего уровня сегментации. Сравнение изменений значений дисперсии результатов классификации полигонов по мере восстановления лесов после пожара показало, что дисперсия увеличивается во времени. В случае исходных полигонов масштаба 1:5000 при классификации на 4 и 10 классов за период с 1995 г. по 2016 г. отмечено четырехкратное увеличение. Подобное изменения дисперсии во времени может быть связано с увеличением разнообразия биотопов по мере восстановления от пожара за счет зарастания послепожарных пустошей.

Проведено сравнение изменений мультифрактальной структуры лесных экосистем по мере лесовосстановления. В качестве показателя для сравнения переходов между уровнями самоподобия (скейлинг) в разные годы может служить частное от деления дисперсии исходного полигона на разность дисперсий и дисперсии всех уровней сегментации. Кривые распределения значений частного от деления дисперсий показали, что по мере восстановления лесов диапазон распределения значений сужается. От 0 – 5.0 в 1995 году до 0 – 1.5 в 2016 году.

Расчеты межгодовых изменений F-теста на подобие между исходным полигоном и полигонами третьего уровня сегментации показали, что значения теста на подобие варьирует в диапазоне от 0 до 0.999. При классификации на 4 и 10 классов в 1995 году большая часть полигонов отличается от исходного полигона и расположена в диапазоне значений F-теста на подобие от 0 до 0.3. По мере восстановления лесов увеличивается доля полигонов с высоким подобием исходному полигону. В 2016 году доля полигонов со значением F-теста выше 0.5 в 2 раза больше полигонов с низким подобием при классификации на 4 класса и почти в 1.5 раза больше при классификации на 10 классов.

Литература

1. Мониторинг биологического разнообразия лесов России: методология и методы / под редакцией А. С. Исаева. – Текст: непосредственный // Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН. – М.: Наука, 2008. – 453 с.
2. Исаев, А.С. Использование спутниковых данных для мониторинга биоразнообразия лесов / А.С.Исаев, С.В. Князева, М.Ю. Пузаченко [и др.]. – Текст: непосредственный // Исследование Земли из космоса. – 2009. № 2. – С. 1-12.
3. Толкач, И.В. Методы основных таксационно-дешифровочных показателей на цифровых снимках / И.В.Толкач. – Текст: непосредственный // Труды БГТУ. – 2012. № 1. – С.63-65.
4. Малышева, Н.В. Дешифрирование древесной растительности на сверх детальных изображений: методическое пособие: учебное электронное издание / Н.В. Малышева. – Текст: электронный // ФГБОУ ВПО МГУЛ: Москва, 2014. – 40 с.
- 5.Терехин, Э. А. Сезонная динамика проективного покрытия растительности агроэкосистем на основе спектральной спутниковой информации / Э.А. Терехин. – Текст: непосредственный // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. т. 16. № 4. – С. 111–123.
6. Методика лесного стереоскопического дешифрирования аэро- и космических снимков. – Леспроект: Санкт-Петербург, 2015. – 23 с.
7. Исаев, А.С. Моделирование лесообразовательного процесса: Феноменологический подход / А.С. Исаев, В.Г. Суховольский, Р.Г. Хлеборос [и др.]. – Текст: непосредственный // Лесоведение. 2005. № 1. – С 3-11.
8. Козодеров, В.В. Методы оценки состояния почвенно-растительного покрова по данным оптических систем дистанционного аэрокосмического зондирования / Козодеров В.В., Кондранин Т.В. – Текст: непосредственный // Москва: МФТИ, 2008. – 222 с.
9. Иванов, Е.С. Некоторые приложения сегментации снимков ДЗЗ / Е.С. Иванов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. Т. 13. № 1. – С. 105–116. – Текст: непосредственный.
10. Барталев, С.А. Анализ возможностей применения методов сегментации спутниковых изображений для выявления изменений в лесах / С.А. Барталев, Т.С. Ховратович. – Текст: непосредственный // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т. 8. – № 1. – С. 44-62.
11. Рылов, С.А. Методы и алгоритмы сегментации мультиспектральных спутниковых изображений высокого пространственного разрешения: 05.13.18: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Рылов Сергей Александрович. – Новосибирск. – 2016. – 135 с. – Текст: непосредственный.
12. Бутусов, О.Б. Мультифрактальная сегментация ландшафтов на космическом изображении / О.Б.Бутусов, Н.И.Редикульцева, О.П. Никифорова. – Текст: непосредственный // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – № 12 (66). Часть 2. – С. 196-203 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.216>
13. Макаренко, Н. Г. Мультифрактальная сегментация данных дистанционного зондирования / Н.Г.Макаренко, О. А. Круглун, И. Н. Макаренко [и др.]. – Текст: непосредственный // Исследование Земли из космоса. – 2008. – № 3. – С. 18–26
14. Шовенгердт, Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Р.А. Шовенгердт. – Москва: Техносфера, 2010. – 560 с. – Текст: непосредственный.
15. Шумаков, Ф.Т. Классификация космических снимков с использованием методов кластерного анализа / Ф.Т. Шумаков, В.А. Толстохатко, А.Ю. Малец // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. Вып. 3/4 (51). – С. 58-62.- Текст: непосредственный.
16. Fu, G., Segmentation for High-Resolution Optical Remote Sensing Imagery Using Improved Quadtree and Region Adjacency Graph Technique / G. Fu, H. Zhao, C. Li, L. Shi // Remote Sensing Journal. – 2013. – No. 5. – P. 3259–3279. doi:10.3390/rs5073259. URL: www.mdpi.com/2072-4292/5/7/3259/pdf

17. Рожков, Ю.Ф. Сравнительная характеристика лесных массивов с использованием сегментации и кластерного анализа снимков Landsat / Ю.Ф. Рожков. – Текст: непосредственный // Вестник СВФУ. Серия Науки о Земле. – 2021. № 4 (24). – С. 33-43.
18. Рожков, Ю.Ф. Оценка динамики восстановления лесов после пожаров в Олекминском заповеднике (Россия) по космическим снимкам Landsat / Ю.Ф. Рожков, М.Ю. Кондакова. – Текст: непосредственный // Nature Conservation Research. Заповедная наука. – 2019. 4 (Suppl.1). – С. 1-10. <https://dx.doi.org/10.24189/ncr.2019.014>
19. Рожков, Ю.Ф. Оценка нарушенности лесных экосистем и их восстановления после пожаров в Олекминском заповеднике (Россия) по космическим снимкам Landsat / Ю.Ф. Рожков, М.Ю. Кондакова. – Текст: непосредственный // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2021, Т. 26, № 2. – С. 94–107. – <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-2-6>
20. Книжников, Ю.Ф., Аэрокосмические методы географических исследований / Ю.Ф. Книжников, В.И. Кравцова, О.В. Тутубалина. – Текст: непосредственный // Москва: Академия, 2004. – 336 с.
21. Мандельброт, Б.Б. Фрактальная геометрия природы / Б.Б. Мандельброт. – Москва: Институт компьютерных исследований. – 2002. – 656 с. – Текст: непосредственный.
22. Mandelbrot, B.B. The fractal geometry of trees and other natural phenomena / B.B. Mandelbrot // Buffon Bicentenary Symposium on Geometrical Probability, ed. R. Miles & J. Serra. Lecture Notes in Biomathematics. – 1978. V.23.- P. 235-249.
23. Рожков, Ю.Ф. Оценка структурных характеристик лесных экосистем с использованием дешифрирования космических снимков высокого и сверхвысокого разрешений / Ю.Ф. Рожков, М.Ю. Кондакова. – Текст: непосредственный // Вестник СВФУ. – 2018. № 1 (63). – С. 38-51. DOI:10.25587/SVFU.2018.63.10539

References

1. Monitoring biologicheskogo raznoobraziya lesov Rossii: metodologiya i metody / pod redaktsiei A. S. Isaeva. – Tekst: neposredstvennyi // Tsentr po problemam ekologii i produktivnosti lesov RAN. – M.: Nauka, 2008. – 453 p.
2. Isaev A.S., Knyazeva S.V., Puzachenko M.Yu. et al. Ispol'zovanie sputnikovyykh dannykh dlya monitoringa bioraznoobraziya lesov // Issledovanie Zemli iz kosmosa. – 2009. No 2.- P. 1-12.
3. Tolkach I.V. Metody osnovnykh taksatsionno-deshifirovochnykh pokazatelei na tsifrovyykh snimkakh // Trudy BGTU. – 2012. No 1.- P.63-65.
4. Malysheva N.V. Deshifirovanie drevesnoi rastitel'nosti na sverkh detal'nykh izobrazheniyakh [Elektronnyy resurs]: metodicheskoe posobie: uchebnoe elektronnoe izdanie. – FGBOU VPO MGUL: Moscow, 2014. 40p.
5. Terekhin E. A. Sezonnaya dinamika proektivnogo pokrytiya rastitel'nosti agroekosistem na osnove spektral'noi sputnikovoi informatsii // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2019. V. 16. No 4.- P. 111–123
6. Metodika lesnogo stereoskopicheskogo deshifirovaniya aero- i kosmicheskikh snimkov. – Lesproekt: Sankt-Peterburg. – 2015. 23 p.
7. Isaev A.S., Sukhovolskii V.G., Khleboros R.G. et al. Modelirovanie lessoobrazovatel'nogo protsessa: Fenomenologicheskii podkhod // Lesovedenie. – 2005. No 1.- P 3-11
8. Kozoderov V.V., Kondranin T.V. Metody otsenki sostoyaniya pochvenno-rastitel'nogo pokrova po dannym opticheskikh sistem distantsionnogo aerokosmicheskogo zondirovaniya. – M: MFTI. 2008.- 222 p.
9. Ivanov E.S. Nekotorye prilozheniya segmentatsii snimkov DZZ // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. – 2016. V. 13. No 1.- P. 105–116
10. Bartalev S.A. Analiz vozmozhnostey primeneniya metodov segmentatsii sputnikovyykh izobrazheniy dlya vyavleniya izmeneniy v lesah / S.A. Bartalev, T.S. Hovratovich // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. – 2011. – v. 8. – No 1. – P. 44-62
11. Rylov S.A. Metody i algoritmy segmentatsii mul'tispektral'nykh sputnikovyykh izobrazheniy vysokogo prostranstvennogo razresheniya/ Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kand. tekhn. nauk. – Novosibirsk. – 2016. – 135 p.

12. Butusov O.B., Redikul'tseva N.I., Nikiforova O.P. Mul'tifraktal'naya segmentatsiya landshaftov na kosmicheskom izobrazhenii // Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal. – 2017. No 12 (66). Chast' 2. P. 196-203 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.216>
13. Makarenko N. G. , Kruglun O. A. Makarenko I. N et al. Mul'tifraktal'naya segmentatsiya dannykh distantsionnogo zondirovaniya // Issledovanie Zemli iz kosmosa .-2008. No 3.- p. 18–26
14. Shovengerdt R.A. Distantsionnoe zondirovanie. Modeli i metody obrabotki izobrazhenii. – Moscow: Tekhnosfera, 2010.- 560 p.
15. Shumakov F.T., Tolstokhat'ko V.A., Malets A. Yu. Klassifikatsiya kosmicheskikh snimkov s ispol'zovaniem metodov klasterного анализа // Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii. – 2011. V. 3/4 (51). -P. 58-62.
16. Fu G., Zhao H., Li C., Shi L. Segmentation for High-Resolution Optical Remote Sensing Imagery Using Improved Quadtree and Region Adjacency Graph Technique // Remote Sens. 2013. No. 5. -P. 3259–3279. doi:10.3390/rs5073259. URL: www.mdpi.com/2072-4292/5/7/3259/pdf
17. Rozhkov Yu.F. Sravnitel'naya harakteristika lesnykh massivov s ispol'zovaniem segmentatsii i klasterного анализа snimkov Landsat // Vestnik SVFU. Seriya Nauki o Zemle. -2021. No 4 (24). – P. 33-43
18. Rozhkov Yu.F., Kondakova M. Yu. Ocenka dinamiki vosstanovleniya lesov posle pozharov v Olekminskom zapovednike (Rossiya) po kosmicheskim snimkam Landsat // Nature Conservation Research. Zapovednaya nauka. – 2019. 4(Suppl.1). – P.1-10.- <https://dx.doi.org/10.24189/ncr.2019.014>
19. Rozhkov Yu.F., Kondakova M. Yu. Otsenka narushennosti lesnykh ekosistem i ikh vosstanovleniya posle pozharov v Olekminskom zapovednike (Rossiya) po kosmicheskim snimkam Landsat // Prirodnye resursy Arktiki i Subarkтики. 2021, V. 26, No 2. P. 94–107. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-2-6>
20. Knizhnikov Yu.F., Kravtsova V.I., Tutubalina O.V. Aerokosmicheskie metody geograficheskikh issledovaniy. – M.: Akademiya, 2004.- 336 p.
21. Mandel'brot B.B. Fraktal'naya geometriya prirody. – M: Institut komp'yuternykh issledovaniy. – 2002.- 656 p.
22. Mandelbrot B.B. The fractal geometry of trees and other natural phenomena/ Buffon Bicentenary Symposium on Geometrical Probability, ed. R. Miles&J. Serra. Lecture Notes in Biomathematics 1978. V.23.- p. 235-249.
23. Rozhkov Yu.F., Kondakova M. Yu. Otsenka strukturnykh kharakteristik lesnykh ekosistem s ispol'zovaniem deshifirovaniya kosmicheskikh snimkov vysokogo i sverkhvysokogo razresheniya // Vestnik SVFU. – 2018. No 1 (63). – P. 38-51. DOI:10.25587/ SVFU.2018.63.10539

Сведения об авторах

РОЖКОВ Юрий Филиппович – к.х.н., заместитель директора по научной работе ФГБУ «Государственный природный заповедник «Олекминский», e-mail: olekmazap-nauka@yandex.ru

ROZHKOV Yuriy Filippovich – Candidate of Chemical Sciences, Deputy Director for Scientific Research, Olyokminsky State Nature Reserve, e-mail: olekmazap-nauka@yandex.ru

КОНДАКОВА Мария Юрьевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник ФГБУ «Гидрохимический институт», e-mail: vesna-dm@mail.ru

KONDAKOVA Maria Yuryevna – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Hydrochemical Institute, e-mail: vesna-dm@mail.ru