

Ю.Ф. Рожков

Государственный природный заповедник «Олекминский», г. Олекминск, Россия

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЛЕСНЫХ МАССИВОВ 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 территории государственного природного заповедника «Олекминский» выделены фрагменты площадью 990 км² (масштаб 1:10000). Затем были сохранены полигоны по четырем уровням детализации – 4, 16, 64, 256 с масштабами 1:5000, 1:2500, 1:1250, 1:675. При дешифрировании проводилась неуправляемая классификация полигонов методом ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique) на 2, 10 классов. Были построены кривые распределения значений индекса лесистости для полигонов 4 уровня сегментации (детализации). Характер кривых близок к нормальному распределению, но кривая для полигона Север более пологая, что говорит о более равномерном распределении индекса лесистости по всем диапазонам значений. По результатам классификации на 10 классов была проведена статобработка с расчетом показателей разности и подобия полигонов – дисперсии генеральной совокупности и теста Фишера (F-тест). Выделены наиболее похожие пары полигонов на разных уровнях сегментации. Рассмотрены результаты изменения дисперсии генеральной совокупности и F-теста на разных уровнях сегментации. Описаны правила перехода между четырьмя уровнями самоподобия (скейлинг) мультифрактальных структур. Было показано, что дисперсия тетрады каждого уровня изменяется на постоянную величину при переходе между уровнями детализации независимо от значений дисперсии в пределах тетрады. Величина переходных коэффициентов при переходе между уровнями сегментации (детализации) является разностью между средними значениями дисперсий каждого из уровней. Величина переходных коэффициентов при переходе между уровнями сегментации определяется разностью между дисперсиями текущего и предыдущего уровня сегментации.

Ключевые слова: дешифрирование космических снимков, сегментация изображений, классификация Isodata, индекс лесистости, уровни самоподобия (скейлинга), мультифрактальные структуры, дисперсия, F-тест.

Yu.F. Rozhkov

Olyokminsky State Nature Reserve, Olyokminsk, Russia

COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF FOREST MASSIVES USING SEGMENTATION AND CLUSTER ANALYSIS OF LANDSAT IMAGES

Abstract. For the purpose of monitoring the state of forest ecosystems, it is most effective to use the capabilities of remote sensing methods. Fragments with an area of 990 km² (scale 1:10,000) were identified on the LANDSAT multispectral satellite images of the territory of the Olyokminsky State Nature Reserve. Then polygons were saved at four levels of detail – 4, 16, 64, 256 with scales of 1:5,000, 1:2,500, 1:1,250, 1:675. When decrypting, an uncontrolled classification of polygons was carried out using the ISODATA method (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique) into 2, 10 classes. Distribution curves of the forest cover index values for polygons of the 4th level of segmentation (detail) were built. The nature of the curves was close to the normal distribution, but the curve for the North polygon was flatter, which indicates a more even distribution of the forest cover index over all ranges of values. According to the results of the classification into 10 classes, statistic processing was carried out with the calculation of indicators of the difference and similarity of polygons: the variance of the general population and the Fisher test (F-test). There were highlighted the most similar pairs of polygons at different

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

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

levels of segmentation. The results of changes in the variance of the general population and the F-test at different levels of segmentation are considered. The rules for the transition between four levels of self-similarity (scaling) of multifractal structures are described. It was shown that the variance of the tetrad of each level changes by a constant value when moving between the levels of detail, regardless of the variance values within the tetrad. The value of the transition coefficients in the transition between the levels of segmentation (detail) is the difference between the average values of the variances of each of the levels. The value of the transition coefficients during the transition between the segmentation levels is determined by the difference between the variances of the current and the previous segmentation level.

Keywords: satellite image interpretation, image segmentation, Isodata classification, forest cover index, levels of self-similarity (scaling), multifractal structures, 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], трехмерном моделировании структуры и динамики таежных ландшафтов [4], почвенно-растительного покрова [5]. Снимки сверхвысокого разрешения позволяют определять такие таксационные характеристики как сомкнутость крон, класс бонитета [6], высоту яруса, средний диаметр и высоту древостоя, относительную полноту, запас, сомкнутость полога, проекции крон [7], проективное покрытие [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). В качестве инструментов дешифрирования широко распространен кластерный анализ [12-13].

Целью настоящего исследования является сравнение двух лесных массивов с использованием инструментов сегментации и кластерного анализа космических снимков Landsat.

Материалы и методы

При осуществлении непрерывного мониторинга за состоянием бореальных лесов использовалось дешифрирование летних снимков Landsat, находящихся в свободном доступе на сайте Earth Explorer. Исследования проводились на территории Олекминского заповедника Юго-Западной Якутии. Для сравнения были выбраны два полигона площадью 990,0 км² (масштаб 1:10000) с доминированием лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii Rupr.*) (рис. 1). Каждый из выбранных полигонов был разбит на четыре полигона масштаба 1:5000. Далее были получены 16 полигонов с масштабом 1:2500. Способ получения полигонов разных масштабов описан ранее [14-15] (рис. 2). На третьем уровне сегментации (детализации) продолжалось разбиение на тетрады. Получилось 64 полигона масштаба 1:1250 (рис. 3). На четвертом уровне детализации получилось 256 полигонов масштаба 1:675 и площадью 4,0 км².

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 показателей, с помощью которых осуществлялся мониторинг состояния лесов, был выбран инструмент кластерного анализа: классификация ISODATA [16]. Была проведена классификация снимков на 2, 10 классов. 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 10 классов была использована при статистическом анализе. Проводилось сравнение по дисперсии генеральной совокупности, тесту Фишера на подобие массивов (F-тест). До проведения статистического анализа все результаты расчета классификации были пересчитаны и приведены к размерности полигона масштаба 1:2500. Результаты пересчета результатов классификации на всех четырех уровнях детализации представлены в табл. 1.

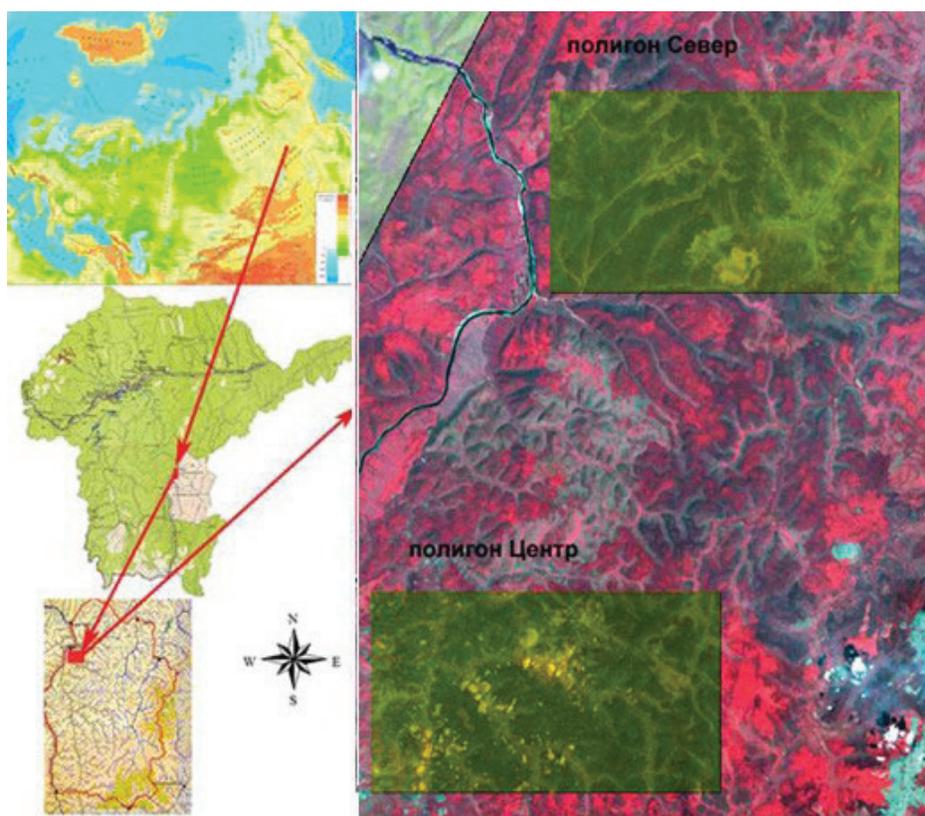


Рисунок 1 – Район исследования



Рисунок 2 – Разбивка фрагмента снимка Landsat масштаба 1 : 10000 на полигоны (4, 16 полигонов)

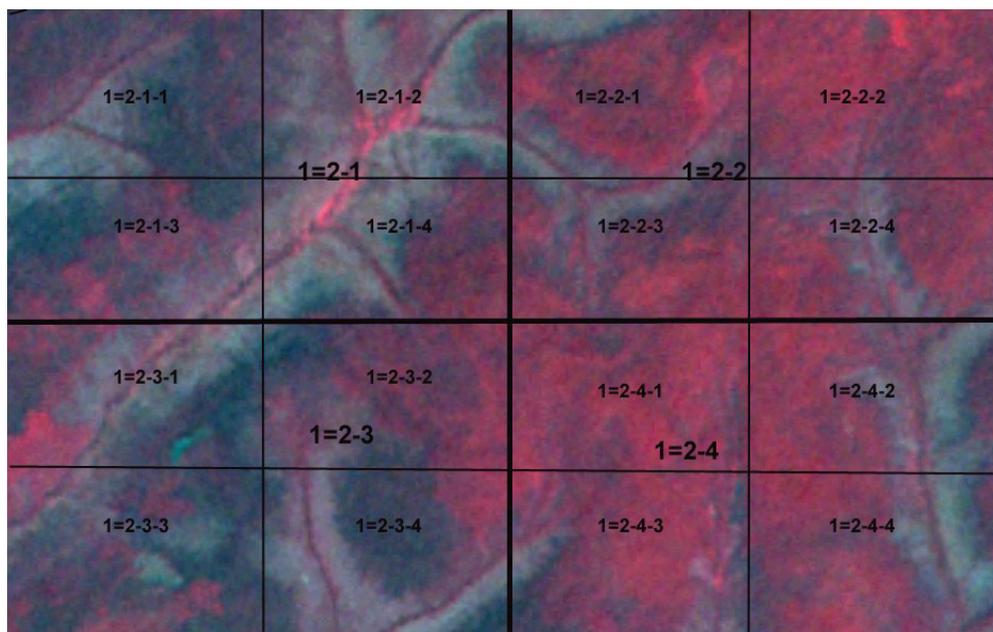


Рисунок 3 – Разбивка фрагмента снимка (1=2) (масштаб 1:2500) на полигоны (4 и 16 полигонов)

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

Номер полигона	1=1-1-2	1=1-1-3	1=1-1-4	1=1-1-1	1-1=1	25-1=1	50-1	100-1
масштаб	1:625	1:625	1:625	1:625	1:1250	1:2500	1:5000	1:10000
1 кл.	576	332	683	823	141	198	348	497
2 кл.	1339	1063	452	336	1317	1367	1051	1158
3 кл.	887	979	1886	1623	1576	1276	1129	1290
4 кл.	1055	1459	1750	560	940	1578	1742	1223
5 кл.	1327	1339	1019	1958	1704	1122	1347	1840
6 кл.	1263	1563	1715	1619	1542	1161	1738	1745
7 кл.	1327	831	703	811	725	1706	979	934
8 кл.	935	1874	476	1323	1052	970	871	540
9 кл.	743	803	1447	995	1184	312	679	679
10 кл.	927	136	248	332	198	690	496	473
Сумма пикселей	10379	10379	10379	10379	10379	10379	10379	10379

Результаты и обсуждение

Особенности распределения полигонов лесного массива по значениям индекса лесистости. Были определены индексы лесистости на всем четырех уровнях детализации по масштабам. Особенности распределения полигонов по значениям индексов представлены в табл. 2.

Индекс лесистости полигона Север в целом равен 0,646. Первая тетрада из полигонов масштаба 1:5000 имеет разброс по значениям индекса лесистости от 0,589 до 0,673. Серия из 16 полигонов масштаба 1:2500 имеет разброс от 0,514 до 0,777. Наконец, серия из 64 полигонов масштаба 1:1250 имеют разброс индекса лесистости от 0,397 до 0,818, а 256 полигонов масштаба 1:625 имеют разброс от 0,301 до 0,868. Индекс лесистости полигона Центр имеет похожий ха-

рактическое распределение. Исходный полигон имеет индекс лесистости выше среднего – 0,634. Но разброс значений на каждом из последующих уровней ниже, чем у полигонов массива Север. Сравните 0,084 и 0,261 для первого уровня; 0,263 и 0,321 для второго; 0,421 и 0,447 для третьего уровня; 0,567 и 0,611 для четвертого уровня сегментации (табл. 2).

Таблица 2 – Характеристика полигонов лесных массивов по значениям индекса лесистости

Масштаб	Площадь полигона (км ²)	Полигон Центр		Полигон Север	
		Диапазон значений	Разброс значений	Диапазон значений	Разброс значений
1:10000	990	0,634	1 полигон	0,646	1 полигон
1:5000	250	0,579-0,840	0,261 из 4-х	0,589-0,673	0,084 из 4-х
1:2500	64	0,520-0,841	0,321 из 16-ти	0,514-0,777	0,263 из 16-ти
1:1250	16	0,412-0,859	0,447 из 64-х	0,397-0,818	0,421 из 64-х
1:625	4	0,300-0,911	0,611 из 256-ти	0,301-0,868	0,567 из 256-ти

В целом, при сравнении распределения индекса лесистости по значениям видно (рис.4), что обе кривые близки к кривым нормального распределения, но кривая для полигона Север более пологая, что говорит о более равномерном распределении индекса лесистости по всем диапазонам значений. Что согласуется с утверждением [17], согласно которому в случае параметрических способов классификации используют закон нормального (гауссова) распределения, типичного для яркостей природных объектов. Для нарушенных экосистем закон нормального (гауссова) распределения не действует. А кривые распределения становятся близкими к нормальному, по мере восстановления экосистемы (например, после пожара) [18].

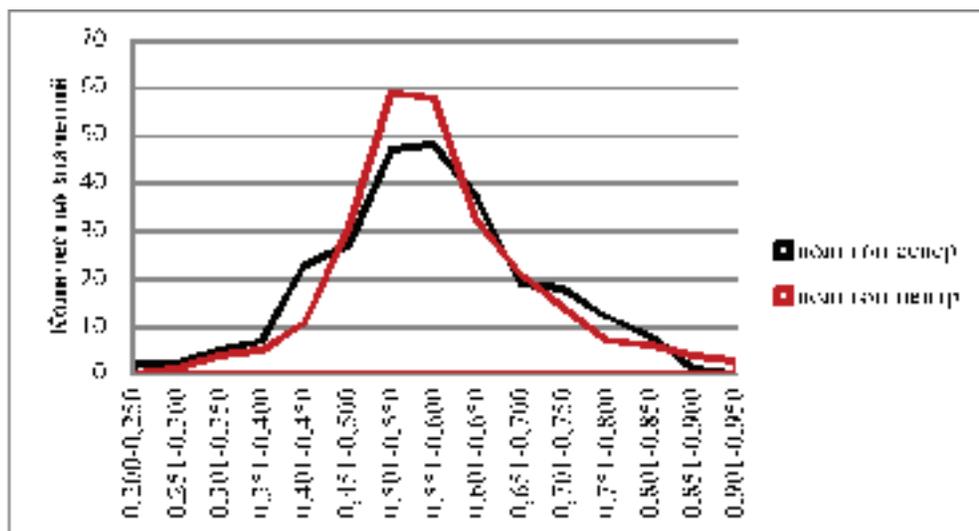


Рисунок 4 – Распределение полигонов масштаба 1:625 (256 шт.) по значениям индексов лесистости

По кривым распределения значений индексов лесистости полигонов третьего уровня сегментации (64 полигона) можно сделать заключение о том, что полигоны 2 и 3 массива Центр близки к кривым нормального распределения, тогда как кривые 1 и 4 характеризуют нарушенные после пожаров экосистемы и отличаются от нормального распределения значений (рис. 5).

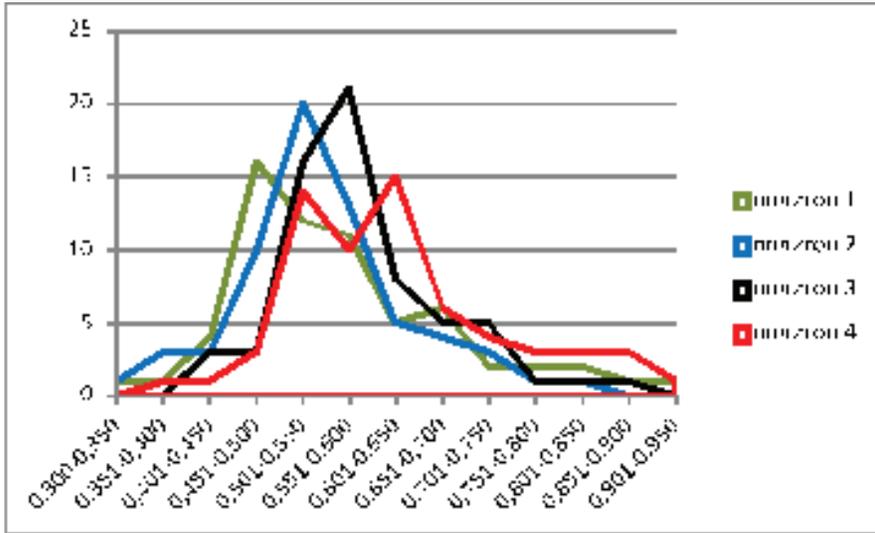


Рисунок 5 – Распределение полигонов массива Центр масштаба 1:1250 (64 шт.) по значениям индексов лесистости

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. Ранее [19] 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 изменяются в широком диапазоне от 0,55 до 0,94. Сравнение неоднородных и однородных массивов леса по показателю дисперсии показало пятикратное превышение дисперсии полигонов при классификации на 10 классов между неоднородными и однородными массивами. В настоящей работе проводилось определение статистических характеристик каждого полигона по уровням сегментации (детализации).

Полигон масштаба 1:625 последовательно сравнивался с полигонами масштаба 1:1250, 1:2500 и исходным полигоном масштаба 1:10000.

На первом уровне сегментации (детализации) (табл. 3) сравнение первой тетрады с исходным полигоном масштаба 1:10000 показало, что по результатам классификации на 10 классов в массиве Центр наиболее подобны исходному полигону полигоны № 2 и № 4. Для них характерны максимальные значения F-теста (0,981 и 0,939 соответственно). В массиве Север наиболее похож на исходный полигон – полигон № 1. Наименее похож на исходный полигон в массиве Север полигон 3 с наименьшими значениями F-теста. По значениям дисперсии генеральной совокупности наибольшая изменчивость результатов классификации характерна для массива Север (дисперсия изменяется от 266375 до 348272), тогда как в массиве Центр она изменяется от 213834 до 231946.

Таблица 3 – Сравнение полигонов первого уровня детализации по статистическим характеристикам

Номер полигона	Дисперсия		F-тест (подобие)	
	Полигон Север	Полигон Центр	Полигон Север	Полигон Центр
1	330657	213834	0,989	0,873
2	304136	227482	0,810	0,981
3	266375	215254	0,486	0,889
4	348272	231946	0,873	0,939

По показателю дисперсии генеральной совокупности проведено сравнение тетрад разного уровня сегментации (детализации). Было показано, что дисперсия тетрады каждого уровня изменяется на постоянную величину при переходе между уровнями сегментации (табл. 4, 5). Тетрада, независимо от значений дисперсии каждого из полигонов, при переходе с первого уровня сегментации ко второму изменяется на величину -11747 для полигона 1 массива Север и на величину -10326 для полигона 3 массива Центр. При переходе со второго к третьему уровню сегментации тетрада выступает также как единое целое с постоянной величиной переходного коэффициента, который составляет -130465 для массива Север и -6103 для массива Центр. Наконец, при переходе между третьим и четвертым уровнем детализации коэффициент перехода также одинаков для всех четырех полигонов тетрады и составляет -77328 для массива Север и 18604 для массива Центр.

Таблица 4 – Сравнение тетрад массива Север с разным уровнем сегментации по показателю дисперсии генеральной совокупности

Сегментация 4-го уровня							
с 1=1-2	разность дисперсий	с 1=1	разность дисперсий	с 1	разность дисперсий	с исходн.	Номер полигона
144277	-77328	221605	13045	208560	-11747	220306	1=1-2-1
237010	-77328	314338	13045	301293	-11747	313039	1=1-2-2
121737	-77328	199065	13045	186020	-11747	197766	1=1-2-3
79656	-77328	156984	13045	143939	-11747	155686	1=1-2-4
145670	-77328	222998	13045	209953	-11747	221699	Средн.
Сегментация 3-го уровня							
		с 1=1	разность дисперсий	с 1	разность дисперсий	с исходн.	Номер полигона
		249296	13045	236251	-11747	247998	1=1-1
		150849	13045	137804	-11747	149551	1=1-2
		189404	13045	176359	-11747	188105	1=1-3
		175320	13045	162275	-11747	174021	1=1-4
		191217	13045	178172	-11747	189919	Средн.
Сегментация 2-го уровня							
				с 1	разность дисперсий	с исходным	Номер полигона
				215132	-11747	226879	1=1
				174143	-11747	185890	1=2
				187322	-11747	199068	1=3
				230877	-11747	242624	1=4
				201869	-11747	213615	Средн.

Возможным объяснением такого изменения дисперсии при переходах между уровнями сегментации (детализации) является фрактальная структура организации, как самих растений, так и растительных сообществ [20-21], основанная на принципе самоподобия. Фрактальное самоподобие (скейлинг) – повторение фракталом самого себя на разных масштабных уровнях. А дисперсия, вернее разность дисперсий позволяет показать переходы между уровнями самоподобия. В настоящем исследовании – между четырьмя уровнями фрактальной организации.

Таблица 5 – Сравнение тетрад массива Центр с разным уровнем сегментации по показателю дисперсии генеральной совокупности

Сегментация 4 –го уровня							
с 3=1-1	раз- ность дис- пер- сий	с 3=1	разность дисперсий	с 3	разность дисперсий	с исходн.	Номер полигона
213505	18604	194901	-6101	201002	-10326	211328	3=1-1-1
212959	18604	194355	-6101	200456	-10326	210782	3=1-1-2
191912	18604	173308	-6101	179409	-10326	189735	3=1-1-3
202880	18604	184276	-6101	190377	-10326	200704	3=1-1-4
Сегментация 3-го уровня							
	С 3=1	разность дисперсий	с 3	разность дисперсий	с исходн.	Номер полигона	
	211329	-6101	217431	-10326	227757	3=1-1	
	212408	-6101	218509	-10326	228836	3=1-2	
	163426	-6101	169527	-10326	179853	3=1-3	
	170629	-6101	176730	-10326	187056	3=1-4	
Сегментация 2-го уровня							
	с 3	разность дисперсий	с исходным	Номер полигона			
	198827	-10326	209153	3=1			
	172083	-10326	182409	3=2			
	152288	-10326	162614	3=3			
	235487	-10326	245813	3=4			

Переходы между уровнями сегментации (детализации) подчиняются следующим правилам:

1. Величина переходных коэффициентов при переходе между уровнями сегментации не зависит от изменений дисперсии в пределах тетрады, а является разностью между средними значениями дисперсий каждого из уровней сегментации (табл. 4).

2. Величина переходных коэффициентов при переходе между уровнями детализации определяется разностью между дисперсиями текущего и предыдущего уровня детализации (табл. 6). Поэтому можно предсказать, каковы будут переходные коэффициенты для пятого уровня сегментации. Например, для тетрады, образованной из полигона 1=1-1-1 переходной коэффициент будет плюс 12576; для тетрады из 1=1-1-2 – минус 101539; для тетрады из 1=1-1-3 – минус 937, а из 1=1-1-4 – плюс 34718 (табл. 6).

3. Величина переходных коэффициентов всех уровней сегментации, в конечном итоге, определяется значением дисперсии исходного полигона.

4. Разность дисперсий текущего уровня и предыдущего уровня сегментации (дисперсия каждого ряда данных определена отдельно) в два раза больше разности дисперсий текущего уровня и дисперсии двух рядов данных – текущего и предыдущего уровня (табл. 6).

Таблица 6 – Сравнение разности дисперсий четырех уровней сегментации лесного массива Север

Сегментация 1-го уровня							
полигон	диспер- сия	дисперсия исходный	разность дисперсий	разность диспер- сий	дисперсия с ис- ходным	диспер- сия	полигон
1	202087	225580	-23493	-11747	213834	202087	1
2	229382	225580	3801	1900	227482	229382	2
3	204928	225580	-20652	-10326	215254	204928	3
4	237663	225580	12083	6041	231622	237663	4

Сегментация 2-го уровня							
полигон	дисперсия	дисперсия 1	разность дисперсий	разность дисперсий	дисперсия с 1	дисперсия	полигон
1=1	228177	202087	26090	13045	215132	228177	1=1
1=2	146200	202087	-55888	-27944	174143	146200	1=2
1=3	172556	202087	-29531	-14766	187322	172556	1=3
1=4	259668	202087	57581	28790	230877	259668	1=4
ср.	201650	202087	-437	-219	201869	201650	ср.
Сегментация 3-го уровня							
полигон	дисперсия	дисперсия 1=1	разность дисперсий	разность дисперсий	дисперсия с 1=1	дисперсия	полигон
1=1-1	270415	228177	42238	21119	249296	270415	1=1-1
1=1-2	73521	228177	-154655	-77328	150849	73521	1=1-2
1=1-3	150631	228177	-77546	-38773	189404	150631	1=1-3
1=1-4	122462	228177	-105714	-52857	175320	122462	1=1-4
ср.	154257	228177	-73920	-36960	191217	154257	ср.
Сегментация 4-го уровня							
полигон	дисперсия	дисперсия 1=1-1	разность дисперсий	разность дисперсий	дисперсия с 1=1-1	дисперсия	полигон
1=1-1-1	295569	270415	25154	12576	282993	295569	1=1-1-1
1=1-1-2	67338	270415	-203077	-101539	168878	67338	1=1-1-2
1=1-1-3	268544	270415	-1871	-937	269480	268544	1=1-1-3
1=1-1-4	339853	270415	69438	34718	305135	339853	1=1-1-4
Ср.	242826	270415	-27589	-13796	256622	242826	Ср.

Заключение

В результате использования сегментации и кластерного анализа в дешифрировании снимков Landsat лесных экосистем Олекминского заповедника была дана сравнительная характеристика двух лесных массивов площадью 990 км² с доминированием лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii Rupr.*) на четырех уровнях сегментации (детализации) на 4, 16, 64, 256 полигонов. Показано, что кривые распределения полигонов по значениям индексов лесистости близки к кривым нормального распределения, но кривая для полигона Север более пологая, что говорит о более равномерном распределении индекса лесистости по всем диапазонам значений.

Каждый полигон тетрады с масштабами 1:625, 1:1250, 1:2500, 1:5000 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 и четвертого уровня детализации. На первом уровне детализации сравнение первой тетрады с исходным полигоном масштаба 1:10000 показало, что по результатам классификации на 10 классов наиболее подобны исходному полигону полигоны 2,4 массива Центр и полигон 1 массива Север. Для них характерны максимальные значения F-теста – более 0,900. Наименее похожи на исходный полигон – полигон 3 для массива Север (значения F-теста 0,486) и полигон 1 для массива Центр (значения F-теста 0,873).

По показателю дисперсии генеральной совокупности было проведено сравнение тетрад разного уровня сегментации. Было показано, что дисперсия тетрады каждого уровня изменяется на постоянную величину при переходе между уровнями детализации независимо от значений дисперсии в пределах тетрады. Величина переходных коэффициентов при переходе между уровнями сегментации (детализации) является разностью между средними значениями дисперсий каждого из уровней. Это связано с фрактальной структурой организации лесных массивов.

Литература

1. Мониторинг биологического разнообразия лесов России: методология и методы / под ред. А.С. Исаева. – 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. // Исследование Земли из космоса. – 2009. – № 2. – С. 1-12.
3. Толкач И.В. Методы основных таксационно-дешифровочных показателей на цифровых снимках / И.В. Толкач // Труды БГТУ. – 2012. – № 1. – С. 63-65.
4. Исаев А.С. Моделирование лесообразовательного процесса: Феноменологический подход / А.С. Исаев, В.Г. Суховольский, Р.Г. Хлеборос и др. // Лесоведение. – 2005. – № 1. – С. 3-11.
5. Козодеров В.В., Кондранин Т.В. Методы оценки состояния почвенно-растительного покрова по данным оптических систем дистанционного аэрокосмического зондирования. – М: МФТИ, 2008. – 222 с.
6. Методика лесного стереоскопического дешифрирования аэро- и космических снимков. – Санкт-Петербург: Леспроект, 2015. – 23 с.
7. Малышева Н.В. Дешифрирование древесной растительности на сверх детальных изображениях. – М.: ФГБОУ ВПО МГУЛ, 2014. – 40 с.
8. Терехин Э.А. Сезонная динамика проективного покрытия растительности агроэкосистем на основе спектральной спутниковой информации / Э.А. Терехин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – том 16, № 4. – С. 111–123.
9. Иванов Е.С. Некоторые приложения сегментации снимков ДЗЗ / Е.С. Иванов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – том 13, № 1. – С. 105–116.
10. Макаренко Н.Г., Мультифрактальная сегментация данных дистанционного зондирования / Н.Г. Макаренко, О.А. Круглун, И.Н. Макаренко и др. // Исследование Земли из космоса. – 2008. – № 3. – С. 18–26.
11. Бутусов О.Б. Мультифрактальная сегментация ландшафтов на космическом изображении / О.Б. Бутусов, Н.И. Редикульцева, О.П. Никифорова // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – № 12 (66). Ч. 2. – С. 196-203. doi: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.216/>
12. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. – М.: Техносфера, 2010. – 560 с.
13. 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.
14. Рожков Ю.Ф. Оценка возможности использования показателя симметрии распределения пикселей в мониторинге состояния лесов при дешифрировании космических снимков среднего и высокого разрешения / Ю.Ф. Рожков, М.Ю. Кондакова // Nature Conservation Research. Заповедная наука. – 2016. – Вып. 1(1). – С. 98–107. doi: 10.24189/ncr.2016.008
15. 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.
16. Рожков Ю.Ф. Мониторинг состояния лесных экосистем с использованием космических снимков высокого и сверхвысокого разрешения / Ю.Ф. Рожков // Вестник СВФУ. Серия «Науки о Земле». – 2019. № 4(16). С.71-81. doi:10.25587/SVFU.2020.16.49741
17. Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В. Аэрокосмические методы географических исследований. – М.: Академия, 2004. – 336 с.
18. 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 // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2021. – том 26, № 2. – С. 94–107.
19. Рожков Ю.Ф. Оценка структурных характеристик лесных экосистем с использованием дешифрирования космических снимков высокого и сверхвысокого разрешений / Ю.Ф. Рожков, М.Ю. Кондакова // Вестник СВФУ. – 2018. – № 1(63). – С. 38-51. doi:10.25587/SVFU.2018.63.10539.
20. Мандельброт Б.Б. Фрактальная геометрия природы. – М: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
21. 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. – Vol. 23. – P. 235-249.

References

1. Monitoring biologicheskogo raznoobrazija lesov Rossii: metodologija i metody / pod red. A.S. Isaeva. – M.: Nauka, 2008. – 453 s.
2. Isaev A.S. Ispol'zovanie sputnikovyh dannyh dlja monitoringa bioraznoobrazija lesov / A.S. Isaev, S.V. Knjazeva, M.Ju. Puzachenko i dr. // Issledovanie Zemli iz kosmosa.- 2009. – № 2. – S. 1-12.
3. Tolkach I.V. Metody osnovnyh taksacionno-deshifrovochnyh pokazatelej na cifrovyh snimkah / I.V. Tolkach // Trudy BGTU. -2012. – № 1. – S-63-65.
4. Isaev A.S. Modelirovanie lesooobrazovatel'nogo processa: Fenomenologicheskij podhod / A.S. Isaev, V.G. Suhovol'skij, R.G. Hleboros i dr. // Lesovedenie. – 2005. – № 1. – S 3-11.
5. Kozoderov V.V., Kondranin T.V. Metody ocenki sostojanija pochvenno-rastitel'nogo pokrova po dannyh opticheskikh sistem distancionnogo ajerokosmicheskogo zondirovanija.- M: MFTI, 2008.- 222 s.
6. Metodika lesnogo stereoskopicheskogo deshifirovanija ajero- i kosmicheskikh snimkov.- Sankt-Peterburg: Lesproekt, 2015. – 23 s.
7. Malysheva N.V. Deshifirovanie drevesnoj rastitel'nosti na sverh detal'nyh izobrazhenijah. – M.: FGBOU VPO MGUL, 2014. – 40 s.
8. Terehin Je.A. Sezonnaja dinamika proektivnogo pokrytija rastitel'nosti agrojekosistem na osnove spektral'noj sputnikovoj informacii / Je.A. Terehin // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa. – 2019. – tom 16, № 4. – S. 111–123.
9. Ivanov E.S. Nekotorye prilozhenija segmentacii snimkov DZZ / E.S. Ivanov // Covremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa. – 2016. – tom 13, № 1. – S. 105–116.
10. Makarenko N.G., Mul'tifraktal'naja segmentacija dannyh distancionnogo zondirovanija / N.G. Makarenko, O.A. Kruglun, I.N. Makarenko i dr. // Issledovanie Zemli iz kosmosa. – 2008. – № 3. – S. 18–26.
11. Butusov O.B. Mul'tifraktal'naja segmentacija landshaftov na kosmicheskom izobrazhenii / O.B. Butusov, N.I. Redikul'ceva, O.P. Nikiforova // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal. – 2017. – № 12 (66). Ch. 2. – C. 196-203. doi: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.216/>
12. Shovengerdt R.A. Distancionnoe zondirovanie. Modeli i metody obrabotki izobrazhenij. – M/: Tehnosfera, 2010. – 560 s.
13. Shumakov F.T., Klassifikacija kosmicheskikh snimkov s ispol'zovaniem metodov klaster'nogo analiza / F.T. Shumakov, V.A. Tolstohat'ko, A.Ju. Malec // Vostochno-Evropeskij zhurnal peredovyh tehnologij. – 2011. – Vyp. 3/4(51). – S. 58-62.
14. Rozhkov Ju.F. Ocenka vozmozhnosti ispol'zovanija pokazatelja simmetrii raspredelenija pikselej v monitoringe sostojanija lesov pri deshifirovanii kosmicheskikh snimkov srednego i vysokogo razreshenija / Ju.F. Rozhkov, M.Ju. Kondakova // Nature Conservation Research. Zapovednaja nauka. – 2016. – Vyp. 1(1). – S. 98–107. doi: 10.24189/ncr.2016.008
15. 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.
16. Rozhkov Ju.F. Monitoring sostojanija lesnyh jekosistem s ispol'zovaniem kosmicheskikh snimkov vysokogo i sverhvyssokogo razreshenija / Ju.F. Rozhkov // Vestnik SVFU. Serija «Nauki o Zemle». – 2019. № 4(16). S.71-81. doi:10.25587/SVFU.2020.16.49741
17. Knizhnikov Ju.F., Kravcova V.I., Tutubalina O.V. Ajerokosmicheskie metody geograficheskikh issledovanij. – M.: Akademiya, 2004. – 336 s.
18. Rozhkov Ju.F. Ocenka narushennosti lesnyh jekosistem i ih vosstanovlenija posle pozharov v Olegminkskom zapovednike (Rossija) po kosmicheskim snimkam Landsat / Ju.F. Rozhkov, M.Ju. Kondakova // Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki. – 2021. – tom 26, № 2. – S. 94–107.
19. Rozhkov Ju.F. Ocenka strukturnyh harakteristik lesnyh jekosistem s ispol'zovaniem deshifirovanija kosmicheskikh snimkov vysokogo i sverhvyssokogo razreshenij / Ju.F. Rozhkov, M.Ju. Kondakova // Vestnik SVFU.- 2018. – № 1(63). – S. 38-51. doi:10.25587/SVFU.2018.63.10539.
20. Mandel'brot B.B. Fraktal'naja geometrija prirody. – M: Institut komp'juternyh issledovanij, 2002. – 656 s.
21. 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. – Vol. 23. – P. 235-249.