

Ю.Ф. Рожков¹, М.Ю. Кондакова²¹Государственный заповедник «Олекминский», г.Олекминск, Россия²Гидрохимический институт, г. Ростов-на-Дону, Россия

e-mail: olekmazap-nauka@yandex.ru

e-mail: vesna-dm@mail.ru

ОЦЕНКА СЕЗОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ЛЕСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕГМЕНТАЦИИ И КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ LANDSAT

Аннотация. Для целей мониторинга состояния лесных экосистем наиболее эффективно использование возможностей дистанционных методов. На мультиспектральных космических снимках Landsat (временная серия летних и осенних снимков за 2000, 2001, 2013, 2014 гг.) территории государственного природного заповедника «Олекминский» выделены фрагменты лесных массивов с доминированием лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii Rupr.*) площадью 250 км² (масштаб 1:5000). Затем были сохранены полигоны по трем уровням сегментации (скейлинга) – 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. Классификация на два класса использовалась для расчета индекса лесистости. Сезонные изменения определялись по разности значений индекса лесистости полигонов летом и осенью. Показано, что чем больше разность, тем больше доля лиственницы в смешанных древостоях. Были построены кривые распределения значений индекса лесистости для полигонов 3 уровня скейлинга. 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). Рассмотрены результаты изменения дисперсии генеральной совокупности и F-теста на разных уровнях сегментации и в разные годы.

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

Yu.F. Rozhkov¹, M.Yu. Kondakova²¹Olyokminsky State Nature Reserve, Olyokminsk, Russia²Hydrochemical Institute, Rostov-on-Don, Russia

e-mail: olekmazap-nauka@yandex.ru

e-mail: vesna-dm@mail.ru

AN ASSESSMENT OF SEASONAL CHANGES IN FORESTS USING THE SEGMENTATION AND CLUSTER ANALYSIS OF LANDSAT SPACE IMAGES

Abstract. For the purposes of monitoring the state of forest ecosystems, it is most effective to use the capabilities of remote methods. On multispectral Landsat satellite images (a time series of summer and autumn images for 2000, 2001, 2013, 2014) of the territory of the Olekminsky State Nature Reserve, fragments of forests dominated by Gmelin larch (*Larix gmelinii Rupr.*) with an area of 250 km² (scale 1:5000). Then the polygons were saved at three levels of segmentation (scaling) – 4, 16, 64 with scales of 1:2500, 1:1250, 1:625. During decryption, uncontrolled classification of polygons using the ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique) method into 2,4,10 classes was carried out. Classification into two classes was used to calculate the forest cover index. Seasonal changes were determined by the difference in the forest cover index values of the polygons in summer and autumn. It has been shown that the greater the difference, the greater the proportion of larch in mixed forest stands. Distribution curves of forest cover index values were constructed for polygons of the 3rd scaling level. Based on the results of classification into 4, 10 classes, statistical processing was carried out with

the calculation of indicators of difference and similarity of polygons – dispersion of the general population and Fisher's test (F-test). The results of changes in population dispersion and F-test at different levels of segmentation and in different years are considered.

Keywords: decoding time series of satellite images, Isodata classification, forest cover index, dispersion, F-test, scaling of multifractal structures.

Введение

Космические снимки различного пространственного и временного разрешения широко используются для выявления изменений, происходящих в окружающем мире. Они позволяют успешно осуществлять мониторинг глобальных процессов (пожары, наводнения, опустынивание, сокращение площади полярных льдов, изменение границы леса, заболачивание и т.д.).

Серия разновременных снимков предоставляет больше возможностей, так как фиксирует на каждом одиночном снимке состояние объекта изучения и характеризует его развитие, изменение при переходе от одного снимка к другому. Различные аспекты изменения состояния лесных экосистем успешно решаются с использованием разновременных серий космических снимков. Это динамика процесса лесообразования [1,2], выявление зон влияния антропогенного загрязнения на лесные экосистемы [3,4], лесопатологический мониторинг [5], мониторинг лесозаготовок, незаконных рубок, буреломов, ветровалов в результате стихий [6,7]. Учет сезонных изменений при выборе снимков – необходимое условие получения надежных результатов при изучении динамики географических объектов по разновременным материалам, поскольку изменения на местности в разные сезоны могут быть сопоставимы и даже превышать многолетние изменения [8]. Сезонность структуры лесов выделяется при сравнении летних и осенних снимков – чтобы разделить хвойные и лиственные породы в смешанных древостоях [9, 10].

Важным методом изучения структуры экосистем на космическом снимке является метод сегментации изображений [11-14]. Он позволяет анализировать мультифрактальную структуру изображений и фрактальное самоподобие (скейлинг) [15,16]. В качестве инструментов дешифрирования широко распространен кластерный анализ [17,18].

Целью настоящего исследования является изучение сезонных изменений лесного массива с доминированием лиственницы с использованием инструментов сегментации и кластерного анализа временных серий космических снимков Landsat и оценкой разности и подобия выбранных фрагментов снимков.

Материалы и методы исследований

При осуществлении непрерывного мониторинга за состоянием бореальных лесов использовалось дешифрирование временной серии летних и осенних снимков Landsat, находящихся в свободном доступе на сайте Earth Explorer. Временная серия состояла из двух пар летних (июль) и осенних (сентябрь) мультиспектральных снимков. Одна пара получена с использованием (восьмиканального радиометра ETM+) Landsat 7 за 2000 (июль), 2001 (сентябрь). Вторая пара мультиспектральных снимков получена со спутника Landsat8 (десятиканальный сканирующий радиометр OLI) за 2013 (июль) и 2014 (сентябрь). Исследования проводились на территории Олекминского государственного природного заповедника Юго-Западной Якутии площадью 851 тыс. га. Для сравнения был выбран исходный полигон ненарушенных лесов 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 (рис. 2). Способ получения полигонов разных масштабов описан ранее [13,19]. На третьем уровне сегментации продолжалось разбиение на тетрады. Получилось 64 полигона масштаба 1:625 и площадью 4.0 км² (рис. 3).

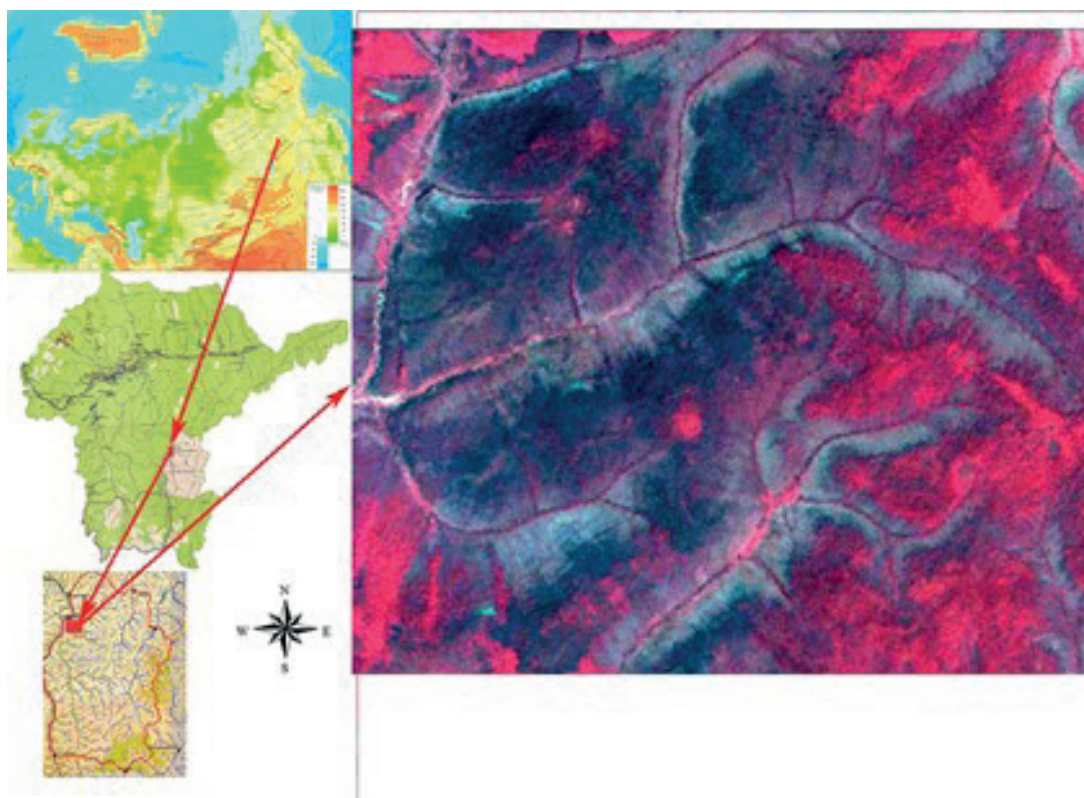


Рис. 1. Район исследования

Fig. 1. Study area

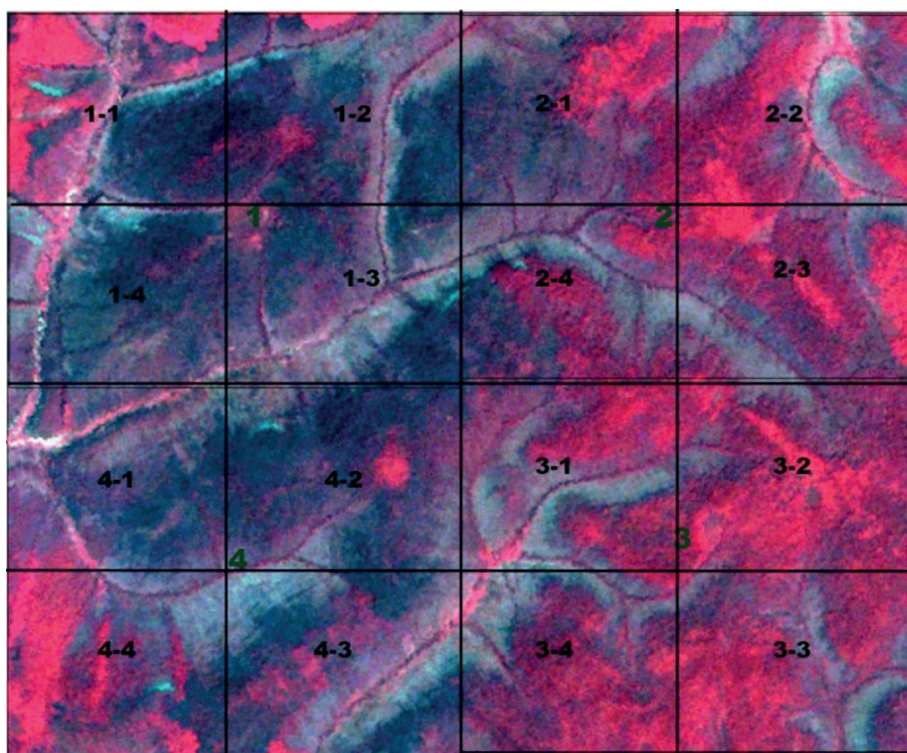


Рис. 2. Разбивка фрагмента снимка Landsat масштаба 1:5000 на полигоны (16 полигонов)

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

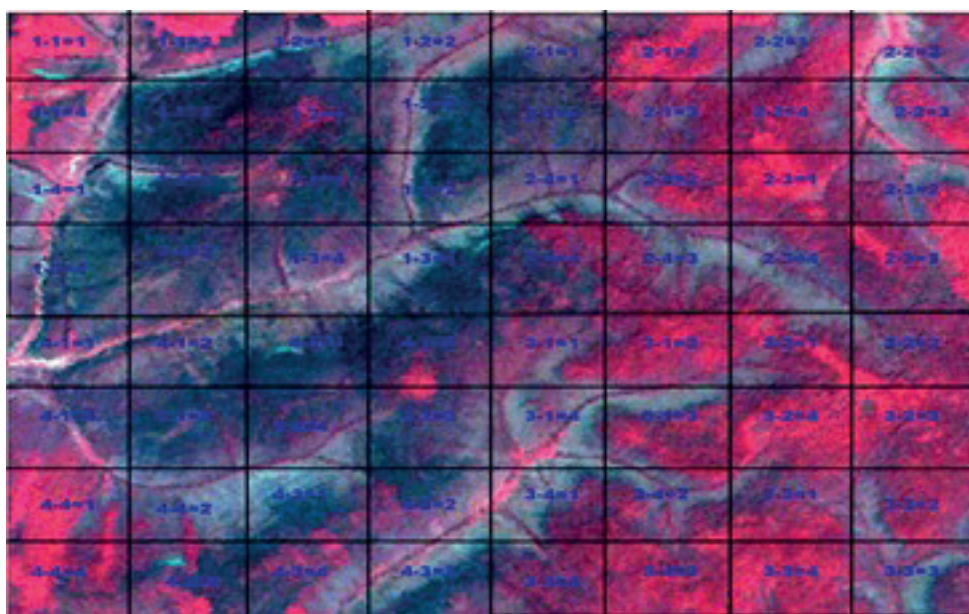


Рис. 3. Разбивка фрагмента снимка Landsat масштаба 1:5000 на полигоны (64 полигона)

Fig.3. Splitting a fragment of a Landsat image at a scale of 1:5000 into polygons (64 polygons)

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 [19]. В качестве объектов для анализа выступают пиксели снимков высокого разрешения, которые соответствуют по шкале биоразнообразия урочищам. При разрешающей способности снимка в 30 м размеры пикселя соответствуют площади 900 м². 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 схожести 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 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 [20], 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.	2080	1260	1460	676	1362	865	749
2 кл.	964	1676	904	1028	1068	1438	1153
3 кл.	768	1036	792	960	600	1403	956
4 кл.	312	1680	1052	1216	1087	792	1290
5 кл.	572	524	404	648	994	1059	1091
6 кл.	768	380	1164	1164	984	805	1313
7 кл.	1720	1512	1220	1796	1085	1101	449
8 кл.	1344	952	1124	1200	891	433	1218
9 кл.	716	748	1424	964	1332	1336	1275
10 кл.	1060	536	760	652	901	1071	809
Сумма пикселей	10304	10304	10304	10304	10304	10304	10304

Результаты и обсуждение

Оценка сезонных изменений значений индекса лесистости в ненарушенном лиственничном массиве. Несмотря на то, что в выбранном лесном массиве доминирует лиственница, в составе древостоя всегда присутствуют другие породы: сосна обыкновенная, сосна кедровая, ель, береза и др. Поэтому, с помощью расчета разности значений индекса лесистости летних и осенних снимков (с учетом хвоепада и листопада) появляется возможность рассчитать долю лиственницы в смешанных древостоях. На первом уровне скейлинга, когда исходный полигон делится на четыре равных части видно, что максимальная доля лиственницы в составе древостоя третьего фрагмента, а минимальная – в первом фрагменте (табл. 2). Причем, это различие сохраняется при расчете разности индекса лесистости лето-осень в двух парах 2000-2001 гг. и

Таблица 2 – Особенности сезонного распределения (лето – осень) значений индекса лесистости лиственничного массива

индекс лесистости / полигон	исходный полигон	первый уровень скейлинга			
		1	2	3	4
июль, 2000 г.	0.637	0.565	0.634	0.715	0.623
сентябрь, 2001 г.	0.450	0.546	0.474	0.485	0.508
разность лето-осень	0.188	0.019	0.160	0.229	0.115
июль, 2013 г.	0.623	0.564	0.660	0.721	0.570
сентябрь, 2014 г.	0.464	0.555	0.489	0.443	0.480
разность лето-осень	0.159	0.009	0.171	0.278	0.090

2013-2014 гг. Разность между индексами лесистости летних и осенних снимков для фрагмента 1 составляет 0,019 (для пары 2000-2001 гг.) и 0,009 (для пары 2013-2014 гг.). Это говорит о том, что в составе древостоя практически отсутствует лиственница и доминируют темнохвойные породы: сосна обыкновенная, сосна кедровая, ель, пихта. Максимальная доля лиственницы регистрируется в 3 фрагменте. Разность индексов максимальная – 0.229(для пары 2000-2001 гг.) и 0.278 (для пары 2013-2014 гг.). Фрагменты 2 и 4 занимают промежуточное положение по значениям разности индексов лесистости.

Более подробную картину распределения древесных пород в составе древостоя выбранного лесного массива можно увидеть на втором уровне скейлинга, когда исходный полигон делится на 16 равных фрагментов (на 4 тетрады) (табл. 3).

Таблица 3 – Особенности распределения полигонов второго уровня скейлинга по значениям индекса лесистости

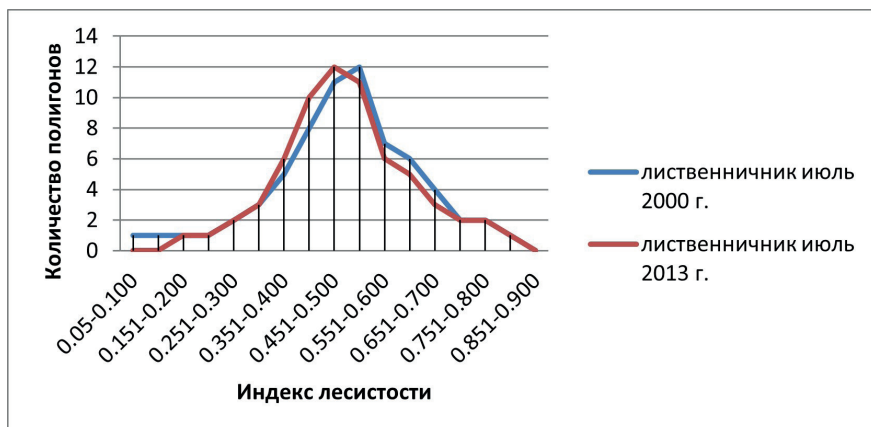
полигон/ индекс лесистости	2000 г., июль	2001 г., сентябрь	разность лето-осень	2013 г., июль	2013 г., сентябрь	разность лето-осень
1=1	0.492	0.446	0.046	0.450	0.418	0.032
1=2	0.643	0.598	0.045	0.631	0.627	0.004
1=3	0.556	0.522	0.034	0.542	0.509	0.034
1=4	0.589	0.567	0.022	0.592	0.545	0.047
2=1	0.642	0.605	0.037	0.657	0.572	0.085
2=2	0.612	0.545	0.067	0.623	0.598	0.024
2=3	0.659	0.484	0.175	0.674	0.545	0.129
2=4	0.661	0.437	0.224	0.682	0.486	0.196
3=1	0.536	0.434	0.103	0.523	0.347	0.176
3=2	0.795	0.433	0.362	0.689	0.439	0.250
3=3	0.722	0.442	0.279	0.729	0.514	0.215
3=4	0.718	0.498	0.220	0.758	0.472	0.286
4=1	0.620	0.536	0.083	0.657	0.530	0.127
4=2	0.638	0.510	0.128	0.584	0.396	0.188
4=3	0.569	0.473	0.095	0.592	0.477	0.115
4=4	0.727	0.478	0.249	0.661	0.472	0.189

В этом случае, также видно, что минимальная разность индексов лесистости (лето-осень) отмечена в первой тетраде (1=1,1=2,1=3,1=4). Что подтверждает доминирование темнохвойных пород. Во второй тетраде картина смешанная. В составе первых двух фрагментов (2=1 и 2=2) также доминируют темнохвойные породы. Разность индексов лесистости летних и осенних фрагментов снимков минимальная. Тогда как для фрагментов 2=3 и 2=4 разность индексов лесистости резко увеличивается, особенно для фрагмента 2=4. Это говорит о преобладании лиственницы в составе древостоя этих фрагментов. Для третьей и четвертой тетрад характерно преобладание лиственницы в составе древостоя. Причем, также как для первого уровня скейлинга максимальная доля лиственницы отмечается для третьего фрагмента, и на втором уровне скейлинга максимальная доля лиственницы отмечена во фрагментах 3=2, 3=3, 3=4 с максимальными значениями разности индексов лесистости лето-осень.

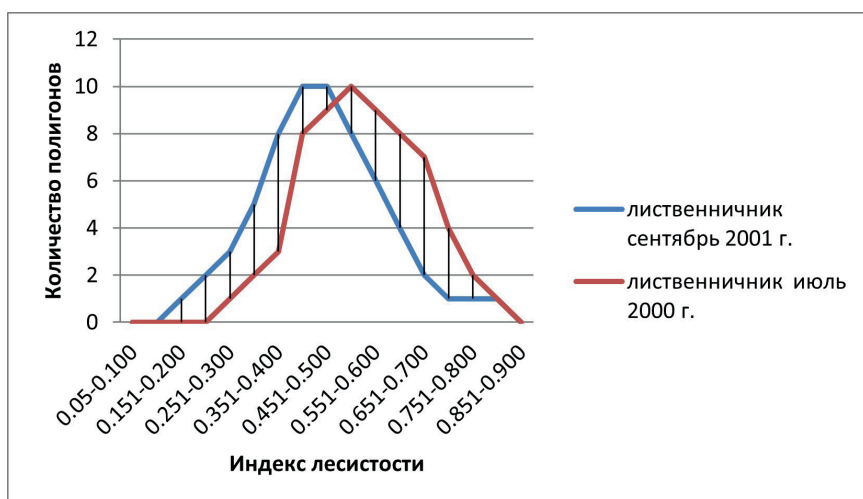
На третьем уровне скейлинга – при выделении 64 фрагментов исходного полигона были построены кривые распределения значений индексов лесистости летних и осенних снимков. Кривые распределения значений для всех четырех снимков близки к нормальному (Гауссову).

Однако, если два летних снимка дают кривые практически одинаковые (рис. 4А), то кривые летние и осенние показывают смещение летних кривых от осенних в сторону увеличения по шкале значений индекса лесистости (рис. 4В и 4С).

А



В



С

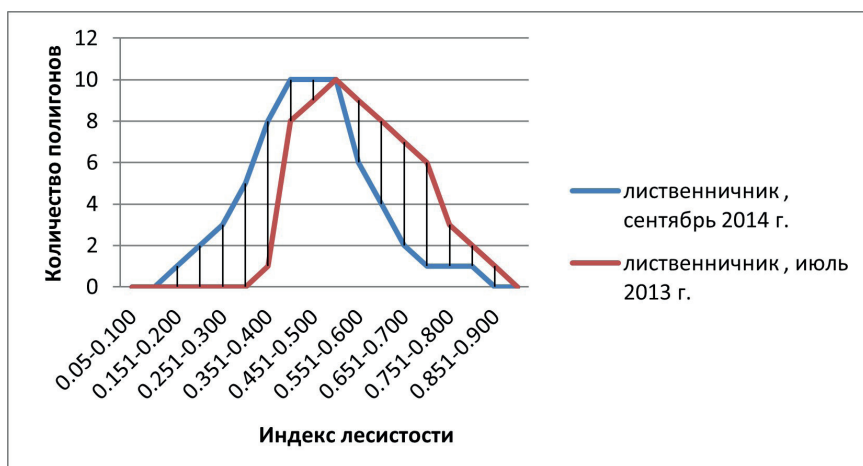


Рис. 4. Распределение полигонов по значениям индекса лесистости третьего уровня скейлинга: А). Июль 2000 и 2013 гг. В). Июль 2000 г. и сентябрь 2001г. С). Июль 2013 г. и сентябрь 2014 г.

Fig.4. Distribution of polygons according to the forest cover index values of the third scaling level: А). July 2000 and 2013; В). July 2000 and September 2001; С). July 2013 and September

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 (скейлинга). Каждый полигон масштаба 1:625 последовательно сравнивался с полигонами масштаба 1:1250, 1:2500 и исходным полигоном масштаба 1:5000. Далее создавалась матрицы распределения значений дисперсии и F-теста на подобие по уровням скейлинга для каждого года. Определялось, насколько полигоны похожи и различаются с исходным полигоном, между собой в тетраде и с полигонами второго, третьего уровня скейлинга.

Распределение дисперсий и разностей дисперсий по уровням скейлинга. В работах Б.Б. Мандельброта [21,22] рассматривается фрактальная структура организации как самих растений, так и растительных сообществ основанная на принципе самоподобия. Ранее [19] 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. При определении дисперсий и их разности для сезонных снимков также были определены переходные коэффициенты между уровнями скейлинга для каждого года (табл. 4-7). В настоящей работе была сделана попытка оценить межгодовую изменчивость мультифрактальной структуры с помощью показателей разности и подобия – дисперсии и F-теста.

Таблица 4 – Распределение дисперсий и разностей дисперсий по уровням скейлинга (2000 г., июль)

Первый уровень скейлинга				дисперсия	разность дисперсий	с исходн.	полигон
				126308	18357	107951	1
				84576	-2509	87085	2
				145145	27775	117370	3
				37280	-26157	63437	4
Второй уровень скейлинга		дисперсия	разность дисперсий	с л1	разность дисперсий	с исходн.	
		74698	-25805	100503	18357	82146	1=1
		236913	55303	181610	18357	163254	1=2
		134976	4334	130642	18357	112285	1=3
		46383	-39962	86345	18357	67989	1=4
Третий уровень скейлинга							
дисперсия	разность дисперсий	с л1=1	разность дисперсий	с л1	разность дисперсий	с исходн.	
307373	116338	191036	-25805	216840	18357	198484	1=1-1
93293	9298	83996	-25805	109800	18357	91444	1=1-2
153645	39474	114172	-25805	139976	18357	121620	1=1-3
106321	15812	90509	-25805	116314	18357	97958	1=1-4
175364	-30775	206139	55303	150836	18357	132479	1=2-1
246817	4952	241865	55303	186562	18357	168206	1=2-2
155636	-40639	196275	55303	140972	18357	122615	1=2-3

144881	-46016	190897	55303	135594	18357	117238	1=2-4
74141	-30418	104559	4334	100224	18357	81868	1=3-1
90436	-22270	112706	4334	108372	18357	90015	1=3-2
356381	110703	245679	4334	241344	18357	222988	1=3-3
30506	-52235	82741	4334	78407	18357	60050	1=3-4
153389	53503	99886	-39962	139848	18357	121492	1=4-1
174161	63889	110272	-39962	150234	18357	131878	1=4-2
83002	18310	64692	-39962	104655	18357	86298	1=4-3
173236	63427	109809	-39962	149772	18357	131415	1=4-4

Таблица 5 – Распределение дисперсий и разностей дисперсий по уровням скейлинга (2001 г., сентябрь)

Первый уровень скейлинга				дисперсия	разность дисперсий	с исходн.	полигон
				91851	11904	79946	1
				107516	19737	87779	2
				65002	-1520	66522	3
				104700	18329	86371	4
Второй уровень скейлинга		дисперсия	разность дисперсий	с л1	разность дисперсий	с исходн.	
		45905	-22973	68878	11904	56974	1=1
		141284	24717	116567	11904	104663	1=2
		76081	-7885	83966	11904	72061	1=3
		59883	-15984	75867	11904	63962	1=4
Третий уровень скейлинга							
дисперсия	разность дисперсий	с л1=1	разность дисперсий	с л1	разность дисперсий	с исходн.	
105729	29912	75817	-22973	98790	11904	86886	1=1-1
299986	127041	172946	-22973	195918	11904	184014	1=1-2
206302	80199	126104	-22973	149077	11904	137172	1=1-3
123589	38842	84747	-22973	107720	11904	95815	1=1-4
206792	32754	174038	24717	149321	11904	137417	1=2-1
229911	44313	185597	24717	160881	11904	148976	1=2-2
236002	47359	188643	24717	163927	11904	152022	1=2-3
123907	-8688	132596	24717	107879	11904	95975	1=2-4
106431	15175	91256	-7885	99141	11904	87236	1=3-1
159497	41708	117789	-7885	125674	11904	113770	1=3-2
198907	61413	137494	-7885	145379	11904	133474	1=3-3
222005	72962	149043	-7885	156928	11904	145024	1=3-4
317052	128584	188467	-15984	204451	11904	192547	1=4-1
289959	115038	174921	-15984	190905	11904	179001	1=4-2
215852	77985	137868	-15984	153851	11904	141947	1=4-3
127349	33733	93616	-15984	109600	11904	97696	1=4-4

Таблица 6 – Распределение дисперсий и разностей дисперсий по уровням скейлинга (2013 г. июль)

Первый уровень скейлинга				дисперсия	разность дисперсий	с исходн.	полигон
				89715	8226	81489	1
				145949	36343	109606	2
				142142	34439	107703	3
				63658	-4803	68461	4
Второй уровень скейлинга		дисперсия	разность дисперсий	с л1	разность дисперсий	с исходн.	
		43342	-23187	66528	8226	58303	1=1
		172103	41194	130909	8226	122683	1=2
		146358	28322	118037	8226	109811	1=3
		51585	-19065	70650	8226	62424	1=4
Третий уровень скейлинга							
дисперсия	разность дисперсий	с л 1=1	разность дисперсий	с л 1	разность дисперсий	с исходн.	
109159	32909	76250	-23187	99437	8226	91211	1=1-1
264362	110510	153852	-23187	177039	8226	168813	1=1-2
213325	84992	128334	-23187	151520	8226	143295	1=1-3
94081	25369	68711	-23187	91898	8226	83672	1=1-4
228708	28303	200405	41194	159211	8226	150986	1=2-1
230893	29395	201498	41194	160304	8226	152079	1=2-2
234266	31082	203184	41194	161991	8226	153765	1=2-3
182218	5058	177160	41194	135967	8226	127741	1=2-4
45364	-50497	95861	28322	67539	8226	59314	1=3-1
133713	-6323	140035	28322	111714	8226	103488	1=3-2
291217	72429	218787	28322	190466	8226	182240	1=3-3
168877	11260	157618	28322	129296	8226	121071	1=3-4
170404	59409	110995	-19065	130059	8226	121834	1=4-1
229073	88744	140329	-19065	159394	8226	151168	1=4-2
51924	169	51755	-19065	70819	8226	62594	1=4-3
73239	10827	62412	-19065	81477	8226	73251	1=4-4

Таблица 7 – Распределение дисперсий и разностей дисперсий по уровням скейлинга (2014 год, сентябрь)

Первый уровень скейлинга				дисперсия	разность дисперсий	с исходн.	полигон
				117161	1657	115505	1
				133830	9991	123839	2
				154383	20268	134116	3
				40016	-36916	76932	4
Второй уровень скейлинга		дисперсия	разность дисперсий	с л1	разность дисперсий	с исходн.	
		68041	-24560	92601	1657	90945	1=1

		289524	86182	203343	1657	201686	1=2
		30325	-43418	73743	1657	72087	1=3
		63016	-27073	90089	1657	88432	1=4
дисперсия	разность	с л1=1	разность дисперсий	с л1	разность дисперсий	с исходн.	
63639	-2201	65840	-24560	90400	1657	88744	1=1-1
277034	104497	172538	-24560	197098	1657	195441	1=1-2
145665	38812	106853	-24560	131413	1657	129756	1=1-3
226897	79428	147469	-24560	172029	1657	170372	1=1-4
163812	-62856	226668	86182	140487	1657	138830	1=2-1
215188	-37168	252356	86182	166175	1657	164518	1=2-2
190055	-49735	239790	86182	153608	1657	151952	1=2-3
143485	-73019	216505	86182	130323	1657	128667	1=2-4
117361	43518	73843	-43418	117261	1657	115604	1=3-1
103271	36473	66798	-43418	110216	1657	108560	1=3-2
363204	166439	196764	-43418	240183	1657	238526	1=3-3
271831	120753	151078	-43418	194496	1657	192840	1=3-4
149079	43032	106047	-27073	133120	1657	131464	1=4-1
150567	43776	106791	-27073	133864	1657	132208	1=4-2
106151	21568	84583	-27073	111656	1657	110000	1=4-3
116653	26819	89835	-27073	116907	1657	115251	1=4-4

Распределение дисперсий и разностей дисперсий по годам. Для расчета межгодовой изменчивости показателей разности и подобия полигонов использовались те же матрицы распределения результатов классификации по тетрадам для уровней скейлинга для каждого года (2000, 2001, 2013, 2014 гг.). Но далее проводилось сравнение всех полигонов трех уровней скейлинга с исходными полигонами масштаба 1:5000 по годам: с 2000, 2001, 2013, 2014 гг. с определением F-теста по подобию и дисперсии генеральной совокупности. В результате получилась интересная картина, характеризующая каждый исходный полигон, независимо от уровня скейлинга. В виде постоянного числа – разности между дисперсиями многочленной матрицы из 84-х полигонов и дисперсией исходного полигона, характеризующего его классификацию на десять классов по методу ISODATA. Независимо от дисперсий каждого полигона матрицы, разность между этой дисперсией и дисперсией исходного полигона каждого года составляет постоянную величину. Между дисперсиями 2000 и 2001 года разность равна 10776, между дисперсиями 2013 и 2001 года – 2611, а для 2014-2013 гг. – 20292. Эти числа получаются при неограниченном варьировании дисперсий выбранной матрицы из 84 полигонов для каждого года (табл. 8-11).

Таблица 8 – Распределение дисперсий и разностей дисперсий по годам (с матрицей 2000 года, июль)

полигон/разность дисперсий	2014г.	разность 2014-2013гг.	2013г.	разность 2013-2001гг.	2001г.	разность 2000-2001гг.	2000г.
1	120078	20292	99786	2611	97175	10776	107951
2	99212	20292	78920	2611	76309	10776	87085
3	129496	20292	109204	2611	106593	10776	117370
4	75564	20292	55272	2611	52661	10776	63437

1=1	94273	20292	73981	2611	71370	10776	82146
1=2	175381	20292	155089	2611	152478	10776	163254
1=3	124412	20292	104120	2611	101509	10776	112285
1=4	80115	20292	59823	2611	57212	10776	67989
1=1-1	210611	20292	190319	2611	187708	10776	198484
1=1-2	103571	20292	83279	2611	80668	10776	91444
1=1-3	133747	20292	113455	2611	110844	10776	121620
1=1-4	110084	20292	89792	2611	87181	10776	97958
1=2-1	144606	20292	124314	2611	121703	10776	132479
1=2-2	180332	20292	160040	2611	157429	10776	168206
1=2-3	134742	20292	114450	2611	111839	10776	122615
1=2-4	129364	20292	109072	2611	106461	10776	117238
1=3-1	93995	20292	73703	2611	71092	10776	81868
1=3-2	102142	20292	81850	2611	79239	10776	90015
1=3-3	235115	20292	214823	2611	212212	10776	222988
1=3-4	72177	20292	51885	2611	49274	10776	60050
1=4-1	133619	20292	113327	2611	110716	10776	121492
1=4-2	144004	20292	123712	2611	121101	10776	131878
1=4-3	98425	20292	78133	2611	75522	10776	86298
1=4-4	143542	20292	123250	2611	120639	10776	131415

Таблица 9 – Распределение дисперсий и разностей дисперсий по годам (с матрицей 2001 года, сентябрь)

полигон /разность дисперсий	2014г.	разность 2014-2013гг.	2013г.	разность 2013-2001гг.	2000г.	разность 2000-2001гг.	2001г.
1	102849	20292	82557	2611	90723	10776	79946
2	110682	20292	90390	2611	98555	10776	87779
3	89425	20292	69133	2611	77298	10776	66522
4	109274	20292	88982	2611	97147	10776	86371
1=1	79877	20292	59584	2611	67750	10776	56974
1=2	127566	20292	107274	2611	115439	10776	104663
1=3	94964	20292	74672	2611	82838	10776	72061
1=4	86865	20292	66573	2611	74739	10776	63962
1=1-1	109789	20292	89496	2611	97662	10776	86886
1=1-2	206917	20292	186625	2611	194790	10776	184014
1=1-3	160075	20292	139783	2611	147948	10776	137172
1=1-4	118718	20292	98426	2611	106591	10776	95815
1=2-1	160320	20292	140028	2611	148193	10776	137417
1=2-2	171879	20292	151587	2611	159753	10776	148976
1=2-3	174925	20292	154633	2611	162798	10776	152022
1=2-4	118878	20292	98586	2611	106751	10776	95975
1=3-1	110139	20292	89847	2611	98013	10776	87236
1=3-2	136673	20292	116380	2611	124546	10776	113770

1=3-3	156377	20292	136085	2611	144251	10776	133474
1=3-4	167927	20292	147634	2611	155800	10776	145024
1=4-1	215450	20292	195158	2611	203323	10776	192547
1=4-2	201904	20292	181611	2611	189777	10776	179001
1=4-3	164850	20292	144558	2611	152723	10776	141947
1=4-4	120599	20292	100306	2611	108472	10776	97696

Таблица 10 – Распределение дисперсий и разностей дисперсий по годам (с матрицей 2013 года, июль)

полигон /разность дисперсий	2001г.	разность 2000-2001гг.	2000г.	разность 2013-2001гг.	2014г.	разность 2014-2013гг.	2013 г.
1	78879	10776	89655	2611	101782	20292	81489
2	106996	10776	117772	2611	129899	20292	109606
3	105092	10776	115868	2611	127995	20292	107703
4	65850	10776	76626	2611	88753	20292	68461
1=1	55692	10776	66468	2611	78595	20292	58303
1=2	120072	10776	130849	2611	142975	20292	122683
1=3	107200	10776	117976	2611	130103	20292	109811
1=4	59814	10776	70590	2611	82717	20292	62424
1=1-1	88601	10776	99377	2611	111504	20292	91211
1=1-2	166202	10776	176978	2611	189105	20292	168813
1=1-3	140684	10776	151460	2611	163587	20292	143295
1=1-4	81061	10776	91838	2611	103964	20292	83672
1=2-1	148375	10776	159151	2611	171278	20292	150986
1=2-2	149468	10776	160244	2611	172371	20292	152079
1=2-3	151154	10776	161930	2611	174057	20292	153765
1=2-4	125130	10776	135906	2611	148033	20292	127741
1=3-1	56703	10776	67479	2611	79606	20292	59314
1=3-2	100877	10776	111654	2611	123780	20292	103488
1=3-3	179629	10776	190406	2611	202532	20292	182240
1=3-4	118460	10776	129236	2611	141363	20292	121071
1=4-1	119223	10776	129999	2611	142126	20292	121834
1=4-2	148557	10776	159334	2611	171460	20292	151168
1=4-3	59983	10776	70759	2611	82886	20292	62594
1=4-4	70641	10776	81417	2611	93544	20292	73251

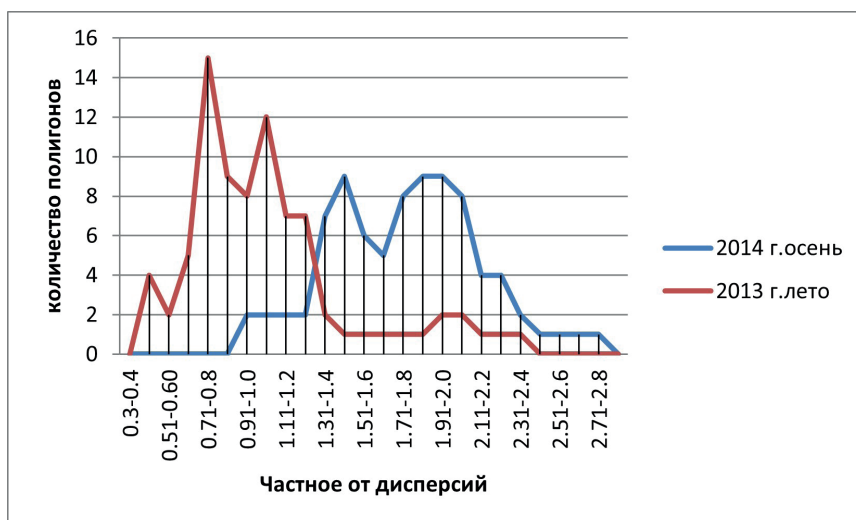
Таблица 11 – Распределение дисперсий и разностей дисперсий по годам (с матрицей 2014 года, сентябрь)

полигон /разность дисперсий	2000 г.	разность 2000-2001 гг.	2001 г.	разность 2013-2001гг.	2013 г.	разность 2014-2013гг.	2014 г.
1	103378	10776	92602	2611	95212	20292	115505
2	111712	10776	100936	2611	103547	20292	123839
3	121989	10776	111213	2611	113823	20292	134116
4	64805	10776	54029	2611	56640	20292	76932

1=1	78818	10776	68042	2611	70652	20292	90945
1=2	189559	10776	178783	2611	181394	20292	201686
1=3	59960	10776	49184	2611	51794	20292	72087
1=4	76305	10776	65529	2611	68140	20292	88432
1=1-1	76617	10776	65841	2611	68451	20292	88744
1=1-2	183314	10776	172538	2611	175149	20292	195441
1=1-3	117630	10776	106853	2611	109464	20292	129756
1=1-4	158246	10776	147469	2611	150080	20292	170372
1=2-1	126703	10776	115927	2611	118538	20292	138830
1=2-2	152391	10776	141615	2611	144226	20292	164518
1=2-3	139825	10776	129049	2611	131659	20292	151952
1=2-4	116540	10776	105764	2611	108375	20292	128667
1=3-1	103478	10776	92701	2611	95312	20292	115604
1=3-2	96433	10776	85657	2611	88267	20292	108560
1=3-3	226399	10776	215623	2611	218234	20292	238526
1=3-4	180713	10776	169937	2611	172547	20292	192840
1=4-1	119337	10776	108561	2611	111171	20292	131464
1=4-2	120081	10776	109305	2611	111915	20292	132208
1=4-3	97873	10776	87097	2611	89707	20292	110000
1=4-4	103124	10776	92348	2611	94959	20292	115251

Ранее [23], нами для сравнения результатов определения дисперсий разного уровня скейлинга использовалось частное от деления каждой из дисперсий матрицы с дисперсией исходного полигона. В результате получились кривые распределения частных от деления дисперсий по годам. Сравнение пар лето-осень показало, что кривая распределения значений частных от дисперсий летних смещена влево относительно осенней кривой- в сторону меньших значений дисперсий (Рис. 5 А, В). Это говорит о том, что значения дисперсий летних снимков меньше осенних для всех уровней скейлинга. Смещение влево по шкале для пары лето-осень 2013-2014 гг. больше, чем для пары лето-осень 2000-2001 гг. Значит, у первой пары дисперсии полигонов летних снимков более чем вдвое меньше дисперсий этих же полигонов осенних снимков.

А



В

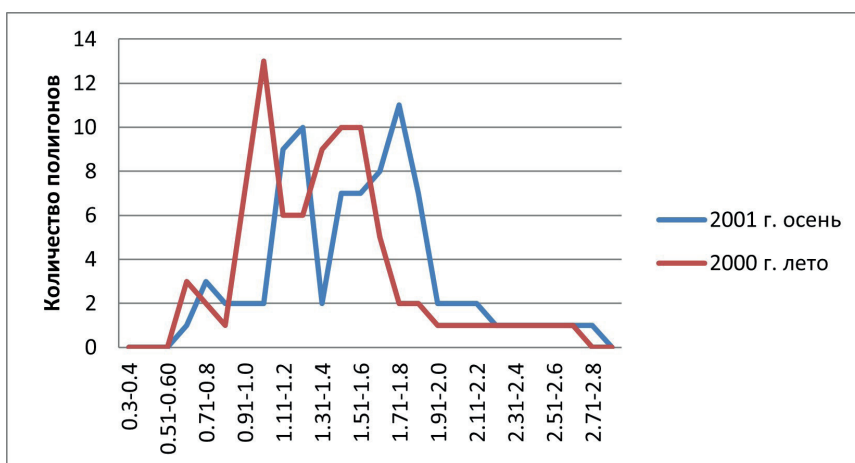


Рис. 5. Кривые распределения значений частного от деления дисперсий по годам (по 84 полигонам).
А). В паре 2013 – 2014 гг. В). В паре 2000-2001 гг

Fig. 5. Distribution curves of quotient of variance values by year (over 84 polygons).
A). In pairs 2013 – 2014; B). In pairs 2000-2001

Взаимосвязь между показателями разности и подобия – между дисперсией и F-тестом (тестом Фишера).

При расчетах статистических показателей разности и подобия (дисперсии и F-теста) необходимо было определить, какая существует взаимозависимость этих показателей на всех уровнях скейлинга. Дисперсия изменялась в широких пределах, тогда как диапазон изменений F-теста был от 0 до 1: от полного подобия при значениях близких к 1, до максимального различия анализируемых пар полигонов при значениях близких к 0.

Было установлено, что для значений дисперсии и F- теста существует обратная зависимость: чем больше значения теста на подобие, тем меньше значения дисперсии. Вернее, разности дисперсий – дисперсии результата классификации полигона и дисперсии между двумя классификациями полигонов матрицы (теми же, для которых определялся F-тест). Причем, разности дисперсий могут иметь как положительные, так и отрицательные значения. Имеет значение абсолютная величина разности дисперсий. То есть, при разности дисперсий + 8000 и – 8000 значение F-теста на подобие будет 0.8. В случае классификации на 10 классов разброс значений F- теста и разности дисперсий выглядит следующим образом (табл. 12):

Таблица 12 – Взаимосвязь между показателями разности и подобия – между дисперсией и F-тестом

значения F-теста	диапазон значений разности дисперсий
0.9- 0.999	0-5000
0.8-0.899	4000-12000
0.7- 0.799	6000-20000
0.6- 0.699	12000-27000
0.5- 0.599	15000-40000
0.4- 0.499	20000-50000
0.3-0.399	30000-70000
0.2- 0.299	50000-80000
0.1-0.199	60000-100000
>0,1	80000-270000

Графически, подобная зависимость выглядит следующим образом (рис. 6):

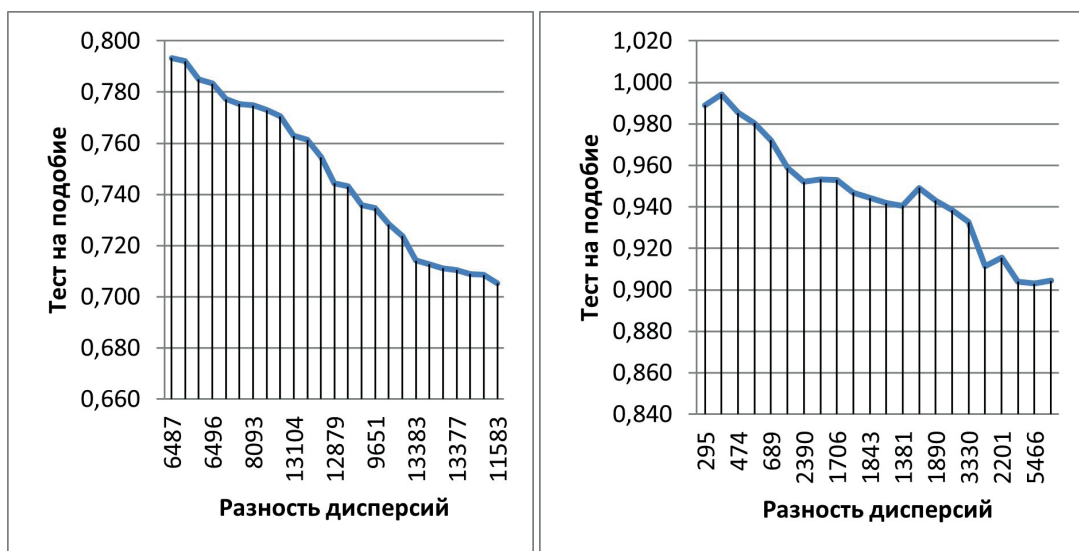


Рис. 6. Зависимость между значениями F-теста и разностью дисперсий:
А). Для значений F-теста 0.7- 0.799; В). Для значений F-теста 0.9- 0.999

Fig. 6. Relationship between F-test values and the difference in variances:
А). For F-test values 0.7-0.799; В). For F-test values 0.9-0.999

Закключение

В результате проведенных исследований сезонных изменений лиственных массивов на снимках Landsat были сделаны следующие выводы:

1. По разности значений индексов лесистости летних и осенних снимков можно оценить долю лиственницы в смешанных древостоях. Чем больше разность между индексами лесистости полигонов на летних (июль) и осенних (сентябрь) снимках, тем больше доля лиственницы в смешанных древостоях.

Летом разность между количеством пикселей с низкими значениями спектральной яркости и пикселями с высокой спектральной яркостью минимальна. Осенью увеличивается разность между количеством пикселей с низкой спектральной яркостью и высокой спектральной яркостью. Прирост количества пикселей пустой на осенних снимках связан с хвоепадом в лиственных лесах в сентябре. Подобная картина сохраняется при анализе снимков Landsat-7(пара 2000-лето, 2001-осень) и Landsat-8(пара 2013-лето, 2014-осень).

2. Кривые распределения значений индексов лесистости для третьего уровня скейлинга (64 полигона) показывают, что они близки к нормальному (Гауссову), но наблюдается смещение влево по шкале значений (в сторону уменьшения) осенних снимков относительно летних. В то время как кривые распределения индексов лесистости летних снимков практически совпадают.

3. Проведены расчеты статистических показателей разности и подобия полигонов – дисперсии генеральной совокупности и F- теста на подобие всех весенних и летних полигонов. Были определены переходные коэффициенты для всех трех уровней скейлинга выбранного фрагмента лесного массива для каждого года.

4. Сделаны расчеты межгодовых переходных коэффициентов между фрагментами снимков 2000, 2001, 2013 и 2014 гг. Показано, что независимо от значений дисперсий в пределах годовой матрицы каждого года (84 полигона), межгодовые переходные коэффициенты имеют постоянные значения. Между дисперсиями 2000 и 2001 года разность равна 10776, между дисперсиями 2013 и 2001 года – 2611, а для 2014-2013 гг. – 20292.

5. Кривые распределения частных от деления дисперсий для осенних и летних снимков показали смещение влево летних кривых относительно осенних. Что говорит о том, что дисперсия результатов классификации на 10 классов у полигонов летних снимков меньше, чем у тех же полигонов осенью.

6. Установлена взаимозависимость между показателями разности и подобия полигонов – между дисперсией генеральной совокупности и F-тестом на подобие. Определено, что для значений дисперсии и F-теста существует обратная зависимость: чем больше значения теста на подобие, тем меньше значения дисперсии.

Литература

1. Жирин, В.М. Эколого-динамическое исследование лесообразовательного процесса по космическим снимкам / В.М. Жирин, С.В. Князева, С.П. Эйлина. – Текст: непосредственный // Лесоведение. – 2013. – № 5. – С. 76-85.
2. Жирин, В.М. Динамика спектральной яркости породно-возрастной структуры групп типов леса на космических снимках LANDSAT / В.М. Жирин, С.В. Князева, С.П. Эйлина. – Текст: непосредственный // Лесоведение. – 2014. – № 5. – С. 3-12.
3. Василевич, М.И. Применение спутниковых методов исследований в мониторинге состояния лесных фитоценозов в зоне выбросов промышленного предприятия / М.И. Василевич, В.В. Елсаков, В.М. Щанов. – Текст: непосредственный // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2014. – Т. 11. – № 1. – С. 30-42.
4. Токарева, О.С. Оценка динамики состояния растений-биоиндикаторов атмосферного загрязнения на основе данных дистанционного зондирования / О.С. Токарева, И.В. Касьянов. – Текст: непосредственный // Вестник науки Сибири. – 2011. – № 1 (1). – С. 268-272.
5. Крылов, А.М. Дистанционный мониторинг состояния лесов по данным космической съемки / А.М. Крылов, Н.А. Владимирова. – Текст: непосредственный // Геоматика. – 2011. – № 3. – С. 53-57.
6. Маркс, А. Мониторинг лесов с помощью группировки спутников Rapid Eye / А. Маркс. – Текст: непосредственный // Геоматика. – 2011. – № 3. – С. 58-66.
7. Ялдыгина, Н.Б. Использование программного комплекса ENVI для решения задач лесного хозяйства / Н.Б. Ялдыгина. – Текст: непосредственный // Геоматика. – 2011. – № 3. – С. 34-39.
8. Лабутина, И.А. Практикум по курсу «Дешифрирование аэрокосмических снимков» / И.А. Лабутина, Е.А. Балдина. – Текст: непосредственный : Учебное пособие. – М.: Географический факультет МГУ, 2013 – 168 с.
9. Плотников, Д.Е. Выделение сезонно-однородных областей на основе анализа временных серий спутниковых изображений / Д.Е. Плотников, П.А. Колбудаев, С.А. Барталёв. – Текст: непосредственный // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 3. – С. 447-456. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-3-447-456.
10. Лашинский, Н.Н. Оценка структуры растительного покрова и его антропогенной трансформации на основе обработки космоснимков QUICKBIRD (Новосибирский Академгородок) / Н.Н. Лашинский, И.Д. Зольников, Н.В. Глушкова // Исследование Земли из космоса. – 2013. – № 1. – С. 71-78. – Текст: непосредственный.
11. Князева, С.В. Методические подходы к оценке характеристик лесов по данным спутниковой съемки сверхвысокого пространственного разрешения в оптическом диапазоне / С.В. Князева, А.Д. Никитина, Е.И. Белова и др. – Текст: непосредственный // Лесоведение. – 2021. – № 6. – С. 645-672.
12. Hossain M.D., Chen D. Segmentation for Object-Based Image Analysis (OBIA): A review of algorithms and challenges from remote sensing perspective // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2019. V.150. P. 115–134.
13. 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

14. 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.
15. 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>
16. 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.
17. Шовенгердт, Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Р.А. Шовенгердт. – Москва: Техносфера, 2010. – 560 с. – Текст: непосредственный.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
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 процесса восстановления лесов после пожара с использованием сегментации и кластерного анализа снимков Landsat / Ю.Ф. Рожков, М.Ю. Кондакова. – Текст: непосредственный // Вестник СВФУ. Серия Науки о Земле. – 2023. – № 2 (30). – С. 72-87.

References

1. Zhirin, V.M. Ekologo-dinamicheskoe issledovanie lesoobrazovatel'nogo processa po kosmicheskim snimkam/ V.M. Zhirin, S. V. Knyazeva, S. P. Ejdlina.- Tekst: neposredstvennyj // Lesovedenie, 2013, No 5, P. 76-85.
2. Zhirin, V.M. Dinamika spektral'noj yarkosti porodno-vozrastnoj struktury grupp tipov lesa na kosmicheskikh snimkah Landsat/ V.M. Zhirin, S. V. Knyazeva, S. P. Ejdlina. – Tekst: neposredstvennyj // Lesovedenie, 2014, No 5, P. 3-12
3. Vasilevich, M.I. Primenenie sputnikovyh metodov issledovaniy v monitoringe sostoyaniya lesnyh fitocenozov v zone vybrosov promyshlennogo predpriyatiya/ M.I. Vasilevich, V.V. Elsakov, V.M. Shchanov. – Tekst: neposredstvennyj // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa .- 2014.- Vol.11, No 1.-P. 30-42.
4. Tokareva, O.S. Ocenka dinamiki sostoyaniya rastenij- bioindikatorov atmosfernogo zagryazneniya na osnove dannyh distancionnogo zondirovaniya / O.S. Tokareva , I.V. Kas'yanov.- Tekst: neposredstvennyj // Vestnik nauki Sibiri. 2011. No 1 (1), P. 268-272
5. Krylov, A.M. Distancionnyj monitoring sostoyaniya lesov po dannym kosmicheskoy s»emki/ A.M. Krylov, N.A. Vladimirova.- Tekst: neposredstvennyj // Geomatika .- 2011, No 3,- P. 53-57
6. Marks, A. Monitoring lesov s pomoshch'yu gruppirovki sputnikov Rapid Eye / A. Marks.- Tekst: neposredstvennyj // Geomatika .- 2011, No 3.- P. 58-66

7. Yaldygina, N.B. Ispol'zovanie programmnoho kompleksa ENVI dlya resheniya zadach lesnogo hozyajstva / N.B. Yaldygina.- Tekst : neposredstvennyj // Geomatika .- 2011, No 3.- P. 34-39
8. Labutina, I.A. Praktikum po kursu «Deshifirovanie aerokosmicheskikh snimkov»/ I.A. Labutina, E.A. Baldina .- Tekst: neposredstvennyj : Uchebnoe posobie. – M.: Geograficheskij fakul'tet MGU.- 2013, 168 p.
9. Plotnikov, D.E. Vydelenie sezonno-odnorodnykh oblastej na osnove analiza vremennykh serij sputnikovyx izobrazhenij / D.E. Plotnikov, P.A. Kolbudaev, S.A. Bartalyov.- Tekst: neposredstvennyj // Komp'yuternaya optika. – 2018. – Vol. 42, No 3. – P. 447-456. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-3-447-456.
10. Lashchinskij, N. N. Ocenka struktury rastitel'nogo pokrova i ego antropogennoj transformacii na osnove obrabotki kosmosnimkov Quickbird (Novosibirskij Akademgorodok) / N. N. Lashchinskij, I. D. Zol'nikov, N. V. Glushkova // Issledovanie Zemli iz kosmosa.- 2013.- No 1.- P. 71–78.-Tekst : neposredstvennyj.
11. Knyazeva, S. V. Metodicheskie podhody k ocenke harakteristik lesov po dannym sputnikovoj s»emki sverhvyssokogo prostranstvennogo razresheniya v opticheskom diapazone / S. V. Knyazeva, A. D. Nikitina, E. I. Belova, A. S. Plotnikova, E. S. Podol'skaya, K. A. Kovganko.-Tekst: neposredstvennyj // Lesovedenie.- 2021.- No 6.- P. 645–672.
12. Hossain M.D., Chen D. Segmentation for Object-Based Image Analysis (OBIA): A review of algorithms and challenges from remote sensing perspective // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2019. V.150. P. 115–134.
13. 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
14. Ivanov, E.S. Nekotorye prilozheniya segmentacii snimkov Dzz / E.S. Ivanov // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.-2016. Vol. 13.No 1.- S. 105–116.- Tekst: neposredstvennyj.
15. Butusov, O.B. Mul'tifraktal'naya segmentaciya landshaftov na kosmicheskom izobrazhenii / O.B.Butusov, N.I.Redikul'ceva, O.P. Nikiforova.- Tekst: neposredstvennyj // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal.- 2017.-No 12 (66). Part 2.- P. 196-203 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.216>
16. Makarenko, N. G. Mul'tifraktal'naya segmentaciya dannyh distancionnogo zondirovaniya / N.G.Makarenko, O. A. Kruglun, I. N. Makarenko [i dr.].- Tekst: neposredstvennyj // Issledovanie Zemli iz kosmosa .-2008.- No 3.- P. 18–26
17. Shovengerdt, R.A. Distancionnoe zondirovanie. Modeli i metody obrabotki izobrazhenij / R.A. Shovengerdt. – Moskva: Tekhnosfera, 2010.- 560 p.- Tekst: neposredstvennyj.
18. Shumakov, F.T. Klassifikaciya kosmicheskikh snimkov s ispol'zovaniem metodov klasternogo analiza / F.T. Shumakov, V.A. Tolstohat'ko, A.Yu. Malec // Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovykh tekhnologij.- 2011. No. 3/4 (51).- P. 58-62.- Tekst: neposredstvennyj.
19. Rozhkov, Yu.F. Sravnitel'naya harakteristika lesnyh massivov s ispol'zovaniem segmentacii i klasternogo analiza snimkov Landsat / YU.F. Rozhkov.- Tekst: neposredstvennyj //Vestnik SVFU. Seriya Nauki o Zemle.-2021 .No 4 (24) .- P. 33-43.
20. Isaev, A.S. Ispol'zovanie sputnikovyx dannyh dlya monitoringa bioraznobraziya lesov / A.S.Isaev, S.V. Knyazeva, M.Yu. Puzachenko [i dr.] .- Tekst: neposredstvennyj // Issledovanie Zemli iz kosmosa.- 2009. No 2.- P. 1-12.
- 21.Mandel'brot, B.B. Fraktal'naya geometriya prirody/ B.B.Mandel'brot.- Moskva: Institut komp'yuternyx issledovanij. -2002.- 656 p.- Tekst: neposredstvennyj.
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. Rozhkov, Yu.F. Ocenka processa vosstanovleniya lesov posle pozhara s ispol'zovaniem segmentacii i klasternogo analiza snimkov Landsat / YU.F. Rozhkov, M.Yu. Kondakova.- Tekst: neposredstvennyj //Vestnik SVFU. Seriya Nauki o Zemle.-2023 .No 2 (30) .- P. 72-87.

Сведения об авторах

РОЖКОВ Юрий Филиппович, кандидат химических наук, 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, 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