УДК 57.036:504.064.37

***Ю. Ф. Рожков*[1], *М. Ю. Кондакова*[2]**

Оценка структурных характеристик лесных экосистем с использованием дешифрирования космических снимков высокого и сверхвысокого разрешений

[1]ФГБУ Государственный природный заповедник «Олекминский», г. Олекминск, Россия
[2]ФГБУ Гидрохимический институт, г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. На примере анализа территории ненарушенного лесного массива в масштабе 1:10000 на космических снимках Landsat и DigitalGlobe показана перспективность использования кластерного анализа разновременных космических снимков при оценке структурных характеристик лесных экосистем. Анализ проводился с помощью неуправляемой классификации методом ISODATA и тематической разности. Тематическая разность рассчитывалась между результатами классификации на 2, 4, 6, 10, 16 классов. Проведено сравнение различных полигонов лесного массива по значениям индекса вегетации NDVI, связанного с продуктивностью лесных экосистем, и индекса SWIR, связанного с влажностью. Показано, что не всегда высокие значения лесистости полигона связаны с высокой продуктивностью и высокой влагообеспеченностью лесов. На снимках с интервалом в 20 лет (1995 и 2015 гг.) сохраняется соотношение между значениями показателя лесистости, продуктивности и влагообеспеченности лесов. Проведен анализ показателя лесистости (индекс лесистости) и показателя разности между 1 классом (леса) и 2 классом (пустоши). Коэффициент корреляции между ними составил 0,99996. Показано, что с увеличением лесистости возрастает доля кластеров со средними значениями спектральной яркости. Если до значений коэффициента лесистости 0,547 преобладают пиксели с максимальным и минимальным значениями спектральной яркости, то после значения коэффициента лесистости 0,577 и выше преобладают классы с пикселями средних значений спектральной яркости. Проведено исследование серий полигонов с изменяющимся масштабом для определения критериев подобия, однородности лесных массивов, оценки густоты древостоя. Показано, чем выше густота древостоя, тем больше разность между 1 классом (леса) и 2 классом (пустоши). Определение F-теста на схожесть массивов данных позволило оценить, насколько однородны исследуемые лесные массивы. Сравнение массивов леса по показателю дисперсии показало пятикратное превышение дисперсии разных полигонов при классификации на 10 классов между неоднородными и однородными массивами.

Ключевые слова: дешифрирование космических снимков, классификация Isodata, тематическая разность, индекс NDVI, индекс SWVI, лесистость, соотношение древостоя и пустошей, продуктивность лесов, влагообеспеченность растений.

DOI 10.25587/SVFU.2018.63.10539

РОЖКОВ Юрий Филиппович – к. х. н., зам. директора по научной работе ФГБУ Государственный природный заповедник «Олекминский».

E-mail: olekmazap-nauka@yandex.ru

ROZHKOV Yuri Filippovich – Candidate of Chemical Sciences, Scientific Deputy Director, Olekminsky Nature Reserve.

КОНДАКОВА Мария Юрьевна – к. б. н., с. н. с. ФГБУ Гидрохимический институт, г. Ростов-на-Дону.

E-mail: vesna-dm@mail.ru

KONDAKOVA Maria Yurievna – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, FGBI Hydrochemical Institute, Rostov-on-Don.

Y. Ph. Rozhkov[1], M. Y. Kondakova[2]

Estimation of Structural Characteristics of Forestry Ecosystems with use of Decoding of Space Images of High and Supervisive Resolutions

[1]Olekminsky Nature Reserve, Olekminsk, Russia
[2]FGBI Hydrochemical Institute, Rostov-on-Don, Russia

Abstract. On the example of the analysis of the undisturbed forest massif territory on a scale of 1:10000, Landsat and DigitalGlobe satellite images show the prospect of using cluster analysis of different space images in assessing the structural characteristics of forest ecosystems. The analysis was carried out with the help of unmanaged classification by the ISODATA method and the thematic difference. The thematic difference was calculated between classification results for 2, 4, 6, 10, 16 classes. Comparison of different forest ranges based on the NDVI vegetation index associated with forest ecosystems productivity and SWIR index associated with moisture was conducted. It shows that high values of forest cover on testing site are not always associated with high productivity and high moisture availability of forests. In pictures showing the interval of 20 years (1995 and 2015), the ratio between the indicator of forest cover values, productivity and moisture availability of forests is maintained. The analysis of forest cover indicator (the index of forest cover) and the index of difference between 1 class (forest) and 2 class (wasteland) is carried out. The correlation coefficient between them was 0.99996. It is shown that with increasing forest cover the share of clusters with average spectral brightness increases. If pixels with maximum and minimum spectral brightness values predominate before the values of the forest cover coefficient of 0.547, the classes with pixels of the average spectral brightness values prevail after the value of the forest cover coefficient of 0.577 and higher. A series of polygons with varying scales was studied in order to determine the similarity criteria, homogeneity of forest tracts, and to estimate the density of the stand. It is shown that the higher the density of the stand, the greater the difference between the 1st class (forest) and the 2nd class (wasteland). The determination of the F-test for the similarity of data sets made it possible to assess how homogeneous the forest areas under investigation are. Comparison of forest arrays by the variance indicator showed a fivefold increase in the variance of different polygons when classified into 10 classes between heterogeneous and homogeneous arrays.

Keywords: interpretation of space images, Isodata classification, thematic difference, NDVI index, SWVI index, woodiness, ratio of stand and wasteland, productivity of forests, moisture content of plants.

Введение

Для целей мониторинга биологического разнообразия лесов 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]. Кроме этих характеристик, дистанционные методы анализа космических снимков используются при определении основных таксационно-дешифровочных показателей [3], трехмерном моделировании структуры и динамики таежных ландшафтов [4-6], почвенно-растительного покрова [7]. В качестве инструментов дешифрирования широко распространен кластерный анализ [8, 9]. Ниже приводится оценка структурных характеристик лесных экосистем, определяемых при дешифрировании космических снимков высокого и сверхвысокого разрешений.

Материалы и методы исследования

Для осуществления непрерывного мониторинга за состоянием бореальных лесов

использовалось дешифрирование мультиспектральных космических снимков высокого разрешения Landsat TM/ETM+, Landsat 8 (разрешение 30 м/пикс.) и RGB-покрытия DigitalGlobe сверхвысокого разрешения (разрешение 0,6 м/пикс.). Исследования проводились на территории Олекминского государственного природного заповедника. Изучаемый лесной массив расположен у истока ручья Курунгнах, притока реки Крестях. Для обработки космических снимков использовался пакет программ ENVI-4.0, ArcGis 10.3, ArcView-3.3 с модулями Image Analyst, Spatial Analyst. В качестве показателей, с помощью которых осуществлялся мониторинг состояния лесов, были выбраны два инструмента кластерного анализа: классификация ISODATA и тематическая разность пикселей [10] .

В основу инструмента неуправляемой классификации мультиспектральных снимков заложен метод кластерного анализа ISODATA, который использует установленное число итераций (перегруппировка пикселов по классам), и порог сходимости для выбранных классов. Выбранный метод неуправляемой классификации является самоорганизующимся, так как исследователь указывает только количество классов, на которые нужно разбить весь массив данных [11]. Нами была проведена классификация снимков на 2, 4, 6, 10, 16 классов. 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 м^2), и пиксели снимков сверхвысокого разрешения, которые по шкале биоразнообразия соответствуют отдельным организмам. Размеры пикселя соответствуют площади 0,36 м^2.

Классификация на два класса позволяет определить индекс лесистости [2], который определяется как отношение площади, покрытой лесной растительностью, к общей площади: $D = df/S$, где: D – лесистость; df – площадь, покрытая лесной растительностью, м^2; S – общая площадь территории, м^2. Ниже проводится исследование связи индекса лесистости с показателем разности результатов классификации и тематической разности между каналами.

Кроме результатов классификации пикселей мультиспектральных снимков, обработке с помощью кластерного анализа подвергались производные, характеризующие отношение двух спектральных каналов – индекс NDVI (4-3 каналы) [12, 13], отражающий изменения продуктивности, индекс SWIR (4-5 каналы) [14], отражающий состояние увлажнения.

В случае каждого из индексов результаты классификации распределились следующим образом: по индексу вегетации (NDVI) в первый класс вошли участки с высокой продуктивностью (от 0,31 до 0,65), во второй класс – участки с низкой продуктивностью (от 0 до 0,3); по индексу SWIR в первый класс вошли участки с низкими значениями индекса (-0,15-0,09), во второй класс – участки с высокими значениями индекса (0,10-0,15) [15].

Кроме того, для проведения анализа использовались серии фрагментов космических снимков с разной площадью по возрастанию. Сохранялись фрагменты по размеру экрана дисплея с разным масштабом [10, 16]. Для анализа выделенных фрагментов лесных массивов по критериям подобия и однородности использовались статистические методы из Microsoft Excel. Ниже представлены результаты совместного применения двух инструментов кластерного анализа пикселей.

Результаты и обсуждение

Было проведено сравнение результатов классификации лесного массива масштаба 1:10000 и четырех фрагментов, его слагающих на снимках Landsat-8 и DigitalGlobe (рис. 1). Распределение пикселей по классам оказалось сходным (табл. 1). Самым лесистым является фрагмент 500.1 с наибольшим количеством пикселей в первом классе и наибольшей разностью между 1 и 2 классами. Наименее лесистым является фрагмент 500.4 с наименьшим количеством пикселей в 1 классе и наименьшей разностью

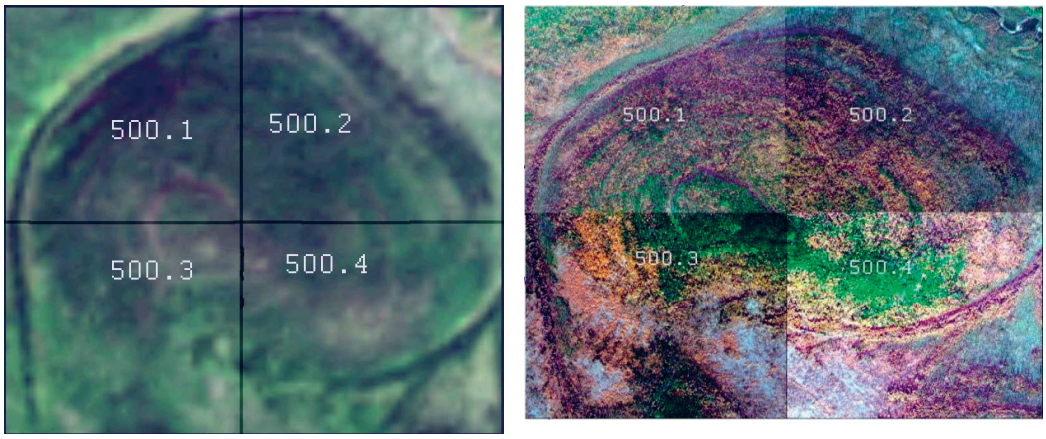


Рис. 1. Сравнение лесного массива в масштабе 1:10000 на снимке Landsat-8 (август 2015 г.) и снимке DigitalGlobe (август 2014 г.)

Таблица 1

Результаты классификации снимка лесного массива на фрагментах снимков масштаба 1:10000 и 1:5000

Снимок DigitalGlobe	1:10000	1:5000-1	1:5000-2	1:5000-3	1:5000-4
1-й класс леса	31880185	8651707	8123273	7639902	7270740
2-й класс пустоши	24854402	5429543	5922080	6319962	6431852
Разность между 1 и 2 классом	**7025783**	**3222164**	**2201193**	**1319940**	**838888**
Снимок Landsat-8	1:10000	1:5000-1	1:5000-2	1:5000-3	1:5000-4
1-й класс леса	4426	1311	1214	1130	942
2-й класс пустоши	3014	569	626	710	938
Разность между 1 и 2 классом	**1412**	**742**	**588**	**420**	**4**

между 1 и 2 классами. Для него также характерно самое высокое значение количества пикселей 2 класса, отражающего долю открытых пространств. Это объясняется тем, что большую часть фрагмента 500.4 занимают редколесья в истоке ручья.

Еще большие различия отмечаются при сравнении результатов классификации фрагментов снимков и индексов NDVI (продуктивности) и SWIR (влажности), сделанных с интервалом в 20 лет (табл. 2).

Таблица 2

Сравнение результатов классификации фрагментов лесного массива на летних снимках Landsat, сделанных с интервалом в 20 лет (в 1995 и 2015 гг.)

Снимок Landsat	Все каналы	Индекс NDVI	Индекс SWIR	Все каналы	Индекс NDVI	Индекс SWIR
Дата съемки	август 2015 г.	август 2015 г.	август 2015 г.	июль 1995 г.	июль 1995 г.	июль 1995 г.
Номер фрагмента	5000-1	5000-1	5000-1	5000-1	5000-1	5000-1
1 класс	1311	1204	654	1374	1115	746

2 класс	569	636	1186	594	853	1140
Разность между 1 и 2 кл.	**742**	568	-532	**780**	262	-394
Номер фрагмента	5000-2	5000-2	5000-2	5000-2	5000-2	5000-2
1 класс	1214	528	986	1120	854	1129
2 класс	626	1302	854	848	1114	728
Разность между 1 и 2 кл.	**588**	-774	132	**272**	-260	401
Номер фрагмента	5000-3	5000-3	5000-3	5000-3	5000-3	5000-3
1 класс	1130	873	651	1120	966	897
2 класс	710	967	1189	**848**	1002	981
Разность между 1 и 2 кл.	**420**	-94	-538	272	-36	-84
Номер фрагмента	5000-4	5000-4	5000-4	5000-4	5000-4	5000-4
1 класс	942	655	882	1053	725	864
2 класс	938	1185	958	915	1243	1045
Разность между 1 и 2 кл.	**4**	-530	-76	**138**	-518	-181

Таблица 3

Связь между индексом лесистости и разностью между 1 классом (леса) и 2 классом (пустоши)

Индекс лесистости	0,511	0,517	0,527	0,545	0,547	0,577	0,641	0,657	0,679	0,728	0,755
Разность между 1 и 2 классом (пиксели)	**18816**	**30035**	**47730**	**79220**	**82446**	**135690**	**247106**	**276807**	**311887**	**403378**	**453142**

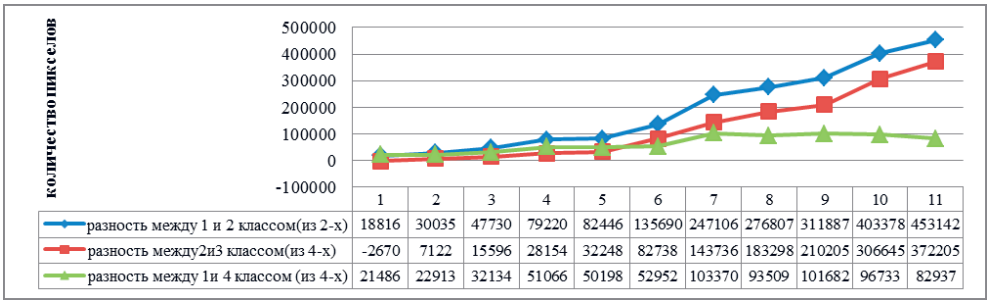
Для самого лесистого фрагмента 500.1 также характерно наибольшее количество пикселей с высокой продуктивностью и наибольшее количество пикселей с низкой влажностью (2 класс индекса SWIR). Причем такая же картина отмечается в 1995 и 2015 гг. Для фрагмента 500.2, несмотря на высокую лесистость, характерно большее количество пикселей с низкой продуктивностью и большей влажностью. Фрагмент 500.3 также характеризуется высокой лесистостью, но низкой продуктивностью и более низкой влажностью. Наконец, фрагмент 500.4 имеет наименьшую лесистость, наименьшую продуктивность и практически равное количество пикселей с низкой и высокой влажностью.

Для определения связи индекса лесистости с разностью между 1 и 2 классами были подготовлены серии полигонов одинакового размера и масштаба, но с разным сочетанием между покрытой лесом территорией и открытыми пространствами. Результаты анализа представлены в табл. 3.

Установлена тесная связь между этими показателями: коэффициент корреляции равен 0,99996. После определения тематической разности были рассчитаны разности между подклассами результатов классификации 4, 6, 10 классов, между подклассами, в которых сосредоточены пиксели с наименьшей спектральной яркостью, связанными с густыми лесами, и подклассами с наибольшей спектральной яркостью, связанными с открытыми пространствами. В случае четырех классов это будет разность между 1 и 4 подклассами, в случае шести классов это будет разность между суммами 1, 2 и 5, 6 подклассов, для

Таблица 4

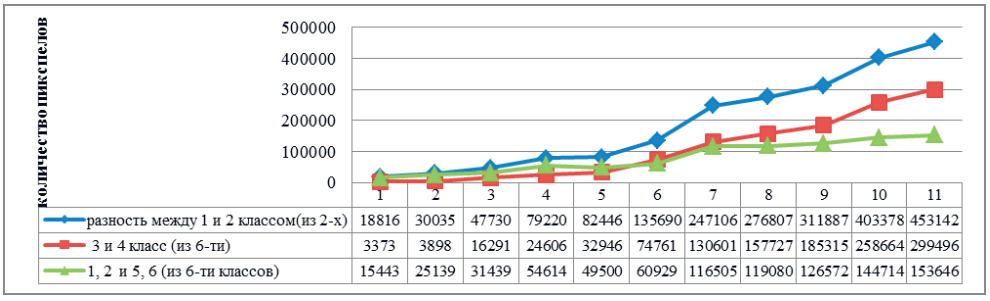
Соотношение между подклассами тематической разности при классификации на 4 класса



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
разность между 1 и 2 классом(из 2-х)	18816	30035	47730	79220	82446	135690	247106	276807	311887	403378	453142
разность между2и3 классом(из 4-х)	-2670	7122	15596	28154	32248	82738	143736	183298	210205	306645	372205
разность между 1и 4 классом (из 4-х)	21486	22913	32134	51066	50198	52952	103370	93509	101682	96733	82937

Таблица 5

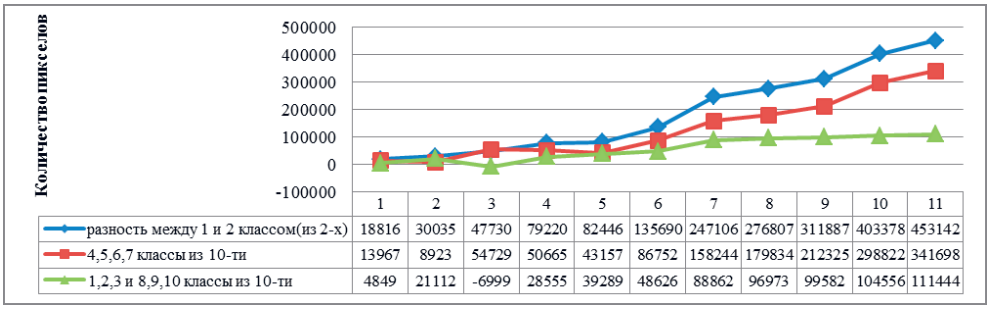
Соотношение между подклассами тематической разности при классификации на 6 классов



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
разность между 1 и 2 классом(из 2-х)	18816	30035	47730	79220	82446	135690	247106	276807	311887	403378	453142
3 и 4 класс (из 6-ти)	3373	3898	16291	24606	32946	74761	130601	157727	185315	258664	299496
1, 2 и 5, 6 (из 6-ти классов)	15443	25139	31439	54614	49500	60929	116505	119080	126572	144714	153646

Таблица 6

Соотношение между подклассами тематической разности при классификации на 10 классов

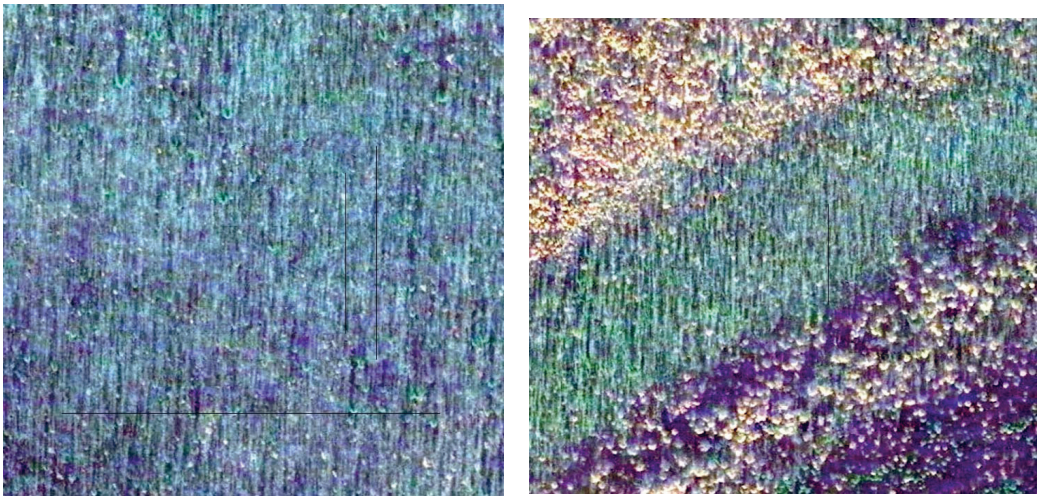


	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
разность между 1 и 2 классом(из 2-х)	18816	30035	47730	79220	82446	135690	247106	276807	311887	403378	453142
4,5,6,7 классы из 10-ти	13967	8923	54729	50665	43157	86752	158244	179834	212325	298822	341698
1,2,3 и 8,9,10 классы из 10-ти	4849	21112	-6999	28555	39289	48626	88862	96973	99582	104556	111444

десяти классов это будет разность между суммами 1, 2, 3 и 8, 9, 10 подклассов. Кроме того, была рассчитана разность между смешанными подклассами [8], в которых сосредоточены пиксели со средними значениями спектральной яркости. В случае четырех классов это будет разность между 2 и 3 подклассами, для 6 классов – это разность между 3 и 4 подклассами, для 10 классов – разность между 4, 5, 6, 7 подклассами. В результате получились кривые зависимости между индексом лесистости (или разностью между 1 классом–леса и 2 классом–пустоши) и соотношением между смешанными подклассами и подклассами с минимальными и максимальными значениями спектральной яркости (табл. 4, 5, 6).



Рис. 2. Снимок DigitalGlobe (август 2014 г.) лесного массива
в масштабе 1:10000 с фрагментами, анализируемыми на подобие и однородность

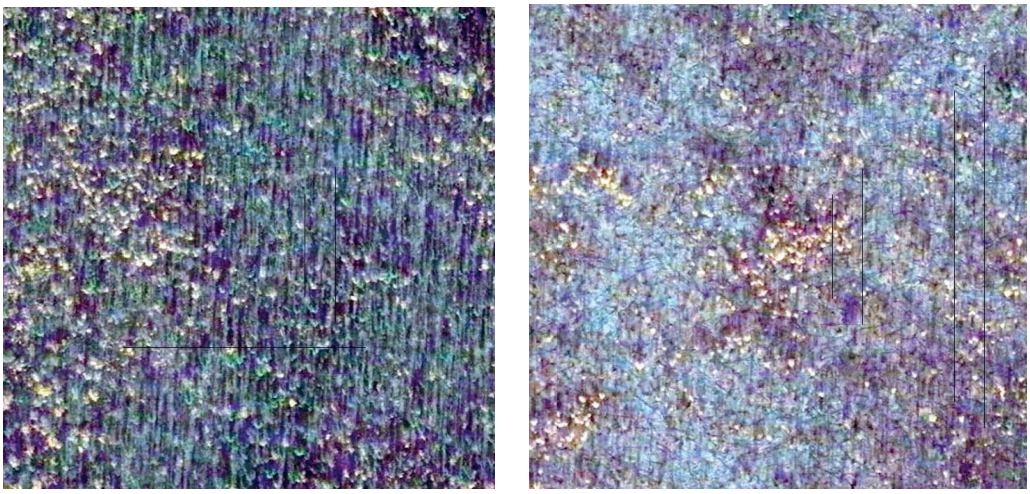


а) б)

Рис. 3. Фрагменты леса с доминированием лиственничника
(редкостойного) (а) и смешанного леса (б). Изменение масштабов на снимке от 1:100 до 1:700

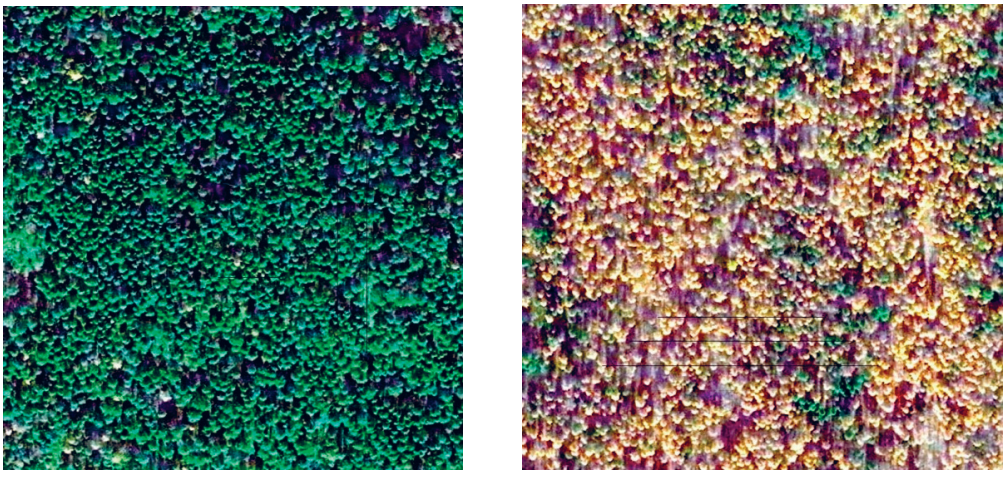
На всех трех графиках видно, что с увеличением лесистости или разности между 1 и 2 классами увеличивается доля смешанных подклассов с промежуточными значениями спектральной яркости. Если до значения индекса лесистости 0,547 (до разности между 1 и 2 классами – 82446 пикселей) преобладают пиксели с максимальными и минимальными значениями спектральной яркости, то начиная с индекса лесистости 0,577 (разности между 1 и 2 классами в 135690 пикселей) неуклонно растет доля пикселей со средними значениями спектральной яркости или смешанных подклассов.

Для разработки критериев для сравнения лесных экосистем по густоте древостоя, однородности и подобия были выделены серии контрастных фрагментов в лесном массиве масштаба 1:10000 (рис. 2, 3, 4, 5).



а) б)

Рис. 4 . Фрагменты леса с доминированием лиственничника (густого) (а) и массива в истоке ручья (б). Изменение масштабов на снимке от 1:100 до 1:700



а) б)

Рис. 5 . Фрагменты леса с доминированием сосны обыкновенной (а) и лиственницы (б). Изменение масштабов на снимке от 1:100 до 1:700

Критерием густоты древостоя является разброс между 1 и 2 классами при классификации на 2 класса. Чем более густой древостой, тем больше разность между 1 и 2 классами. Это видно на рис. 6 при сравнении редкостойного (рис. 3а) и густого лиственничника (рис. 4а), массива с доминированием сосны (рис. 5а) и лиственницы (рис. 5б). Древостой с доминированием сосны обыкновенной (рис. 5а) более редкий, чем на фрагменте с доминированием лиственницы (рис. 5б).

Для сравнения полигонов по критерию однородности все результаты расчетов тематической разности фрагментов разных масштабов были пересчитаны и приведены к размерам полигона масштаба 1:400. Результаты пересчета для фрагмента редкостойного лиственничника (рис. 3а) приведены на рис. 7. При тематической разности для 6 классов все четыре ряда значений практически параллельны, что говорит о незначительной изменчивости распределения древостоя при изменении масштаба. При тематической разности для 10 классов изменчивость распределения древостоя отмечается для 4 и 5 рядов распределения пикселей.

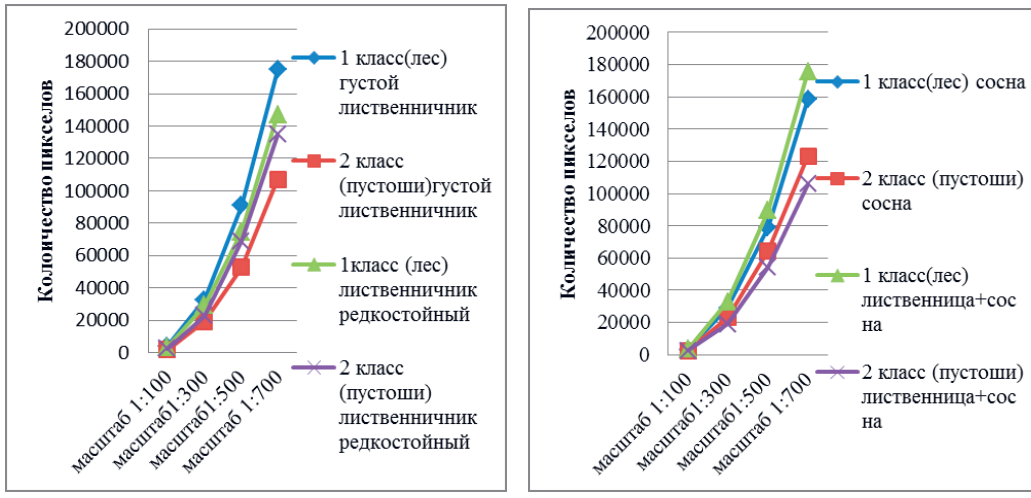


Рис. 6. Сравнение фрагментов леса по густоте древостоя

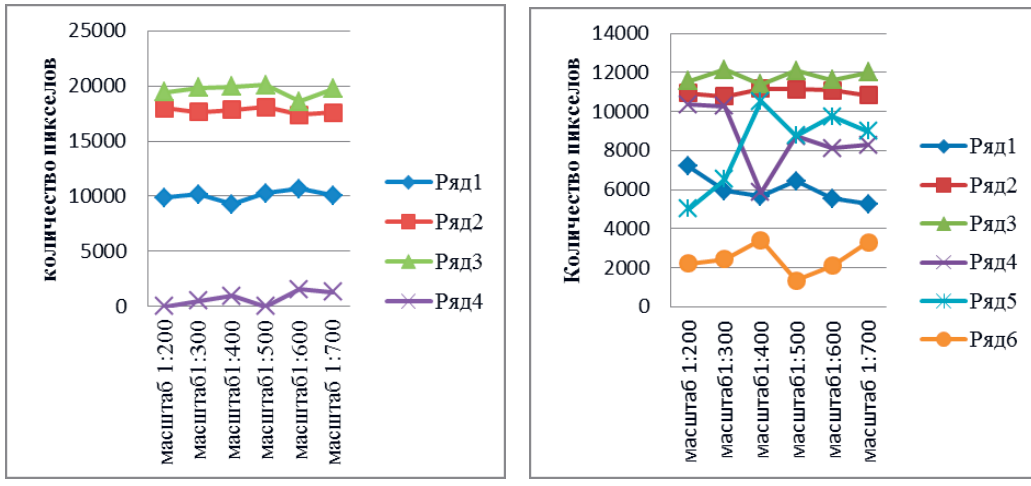


Рис. 7. Сравнение полигонов однородного лесного массива (лиственничник редкостойный, рис. 3 а) с полигоном масштаба 1: 400. Подкласс тематической разности (леса) при классификации на 6 классов – а); при классификации на 10 классов – б)

Количественно оценить подобие полигонов для однородных и неоднородных лесных массивов можно с помощью расчета F-теста на подобие (сходство двух совокупностей) из стандартного набора статистических инструментов Microsoft Excel. Результаты сравнения разных фрагментов по критерию подобия приведены в табл. 7.

Таблица 7

Сравнение полигонов лесного массива с полигоном масштаба 1: 400 по F-критерию подобия (сходства двух совокупностей)

Неоднородный лесной массив (смешанный лес- рис. 3б)	Масштаб 1:200	Масштаб 1:300	Масштаб 1:400	Масштаб 1:500	Масштаб 1:600	Масштаб 1:700	Средний F-критерий
1подкласс 10 кл. (леса)	0,887588	0,912702	1	0,940233	0,865706	0,85056	0,911131

2 подкласс 10 кл. (пустоши)	0,905236	0,938116	1	0,94191	0,770238	0,759715	0,885869
1подкласс 16 кл. (леса)	0,872944	0,916432	1	0,912927	0,824689	0,798182	0,887529
2 подкласс 16 кл. (пустоши)	0,877978	0,920208	1	0,897998	0,736459	0,689925	0,853761
Однородный массив – рис. 3а (лиственничник)	масштаб 1:200	масштаб 1:300	масштаб 1:400	масштаб 1:500	масштаб 1:600	масштаб 1:700	средний F-критерий
1 подкласс 10 кл. (леса)	0,967036	0,979805	1	0,916621	0,934021	0,982361	0,963307
2 подкласс 10 кл. (пустоши)	0,950318	0,931879	1	0,961316	0,92523	0,984083	0,958804
1 подкласс 16 кл. (леса)	0,904581	0,927635	1	0,973928	0,951807	0,937867	0,949303
2 подкласс 16кл. (пустоши)	0,932057	0,930431	1	0,93286	0,949986	0,917123	0,943743
Однородный лесной массив – сосна, рис. 5а	масштаб 1:200	масштаб 1:300	масштаб 1:400	масштаб 1:500	масштаб 1:600	масштаб 1:700	средний F-критерий
1 подкласс 10 кл. (леса)	0,968963	0,990467	1	0,968584	0,987296	0,969858	0,977034
1 подкласс 16 кл. (леса)	0,94576	0,997616	1	0,970535	0,994971	0,963504	0,974477
Неоднородный лесной массив в истоке ручья – рис. 4 б	масштаб 1:200	масштаб 1:300	масштаб 1:400	масштаб 1:500	масштаб 1:600	масштаб 1:700	средний F-критерий
1 подкласс 10 кл. (леса)	0,718339	0,864833	1	0,941203	0,928629	0,940606	0,936813
1 подкласс 16 кл. (леса)	0,552293	0,837636	1	0,849916	0,929597	0,911158	0,846767

В случае однородных лесных массивов значения F-теста на подобие во всех случаях выше 0,9. Для некоторых полигонов он выше 0,99. Для неоднородных лесных массивов значения варьируются от 0,55 до 0,94.

Оценить однородность лесного массива можно с помощью расчетов показателей дисперсии генеральной совокупности. Визуально разброс значений при распределении пикселей по классам (классификации на 10 классов) хорошо виден при сравнении однородного лесного массива (редкостойный лиственничник – рис. 3а) и неоднородного массива (смешанный лес – рис. 3б) на рис. 8.

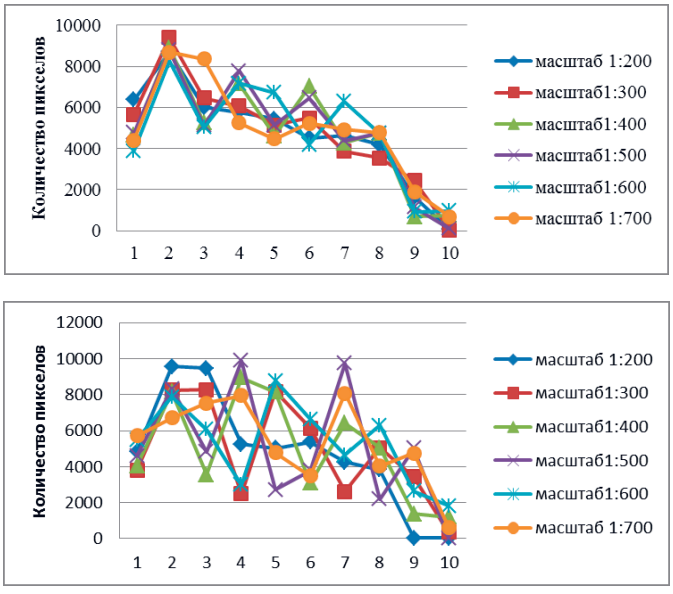


Рис. 8. Сравнение полигонов однородного лесного массива (лиственничник редкостойный) – а) и неоднородного лесного массива (смешанный лес) – б)

Количественная оценка величины разброса для каждого из классов представлена в табл. 8, 9. По суммарным значениям дисперсии однородный и неоднородный лесные массивы различаются более чем в 5 раз; по суммарным значениям стандартного отклонения и среднего отклонения – различия более чем в 2 раза. Причем для разных классов дисперсия генеральной совокупности сильно варьирует. Для однородного лесного массива (редкостойный лиственничник) наибольшая дисперсия отмечена для 3, 4, 6 классов, а для неоднородного массива (смешанный лес) наибольшая дисперсия наблюдается у 4, 5, 7 классов.

Таблица 8

Сравнение полигонов однородного лесного массива (редкостойный лиственничник) с полигоном масштаба 1: 400 по показателям дисперсии

Классы	Масштаб 1:200	Масштаб 1:300	Масштаб 1:400	Масштаб 1:500	Масштаб 1:600	Масштаб 1:700	Дисперсия	Ср. отклонение	Стандартное отклонение
1	6373,6	5660,9	4634	4784,1	3876,7	4408,6	684065	707,3	827,1
2	8714,1	9391,3	8900	8791,9	8255,0	8693,7	112478	236,7	335,4
3	6008,1	6466,1	5241	5114,9	5039,9	8362,6	1345228	917,0	1159,8
4	5765,7	6073,3	7154	7780,9	7181,4	5256,9	798640	836,7	893,7
5	5447,8	5145,9	4622	5150,8	6709,9	4469,9	532329	547,4	729,6
6	4510,1	5480,5	7015	6451,8	4200,5	5219,1	991118	836,3	995,5
7	4613,3	3870,1	4274	4375,2	6297,1	4928,4	597002	590,9	772,6
8	4192,1	3540,9	4748	4761,7	4723,7	4768,1	209115	392,87	457,3
9	1641,1	2449,1	690	1146,7	930,4	1900,2	362751	537,2	602,3
10	50,1	30,1	750	110,1	972,9	685,3	151570	378,0	389,3
Суммарные значения							5784296	5980,4	7162,6

Таблица 9

Сравнение полигонов неоднородного лесного массива (смешанный лес) с полигоном масштаба 1: 400 по показателям дисперсии

Классы	Масштаб 1:200	Масштаб 1:300	Масштаб 1:400	Масштаб 1:500	Масштаб 1:600	Масштаб 1:700	Дисперсия	Ср. отклонение	Стандартное отклонение
1	4843,8	3806,4	4045	4598,5	5494,1	5730,1	488893	603,1	699,2
2	9552,5	8244,6	8137	8328,7	7885,3	6707,4	693152	566,1	832,6
3	9469,1	8279,9	3569	4836,6	6067,5	7525,4	4081142	1800,2	2020,2
4	5245,2	2503,9	8953	9876,7	2980,4	7954,6	8182857	2675,8	2860,6
5	5018,6	8173,8	8139	2705,6	8776,7	4775,6	4984148	2098,3	2232,5
6	5372,3	6149,4	3080	3790,3	6628,9	3492,2	1861250	1298,0	1364,3
7	4263,7	2617,3	6410	9728,2	4643,4	8076,8	5777967	2115,1	2403,7
8	3822,6	5055,7	5047	2197,5	6286,0	4022,8	1622013	1057,6	1273,6
9	47,7	3441,9	1369	5026,7	2633,6	4741,3	3125701	1526,6	1767,9
10	27,8	350,4	1213	44,8	1815,6	638,4	418808	555,1	647,2
Суммарные значения							31235931	14295,9	16101,8

Заключение

На примере анализа территории ненарушенного лесного массива в масштабе 1:10000 на космических снимках Landsat и DigitalGlobe показана перспективность использования кластерного анализа разновременных космических снимков при оценке структурных характеристик лесных экосистем. Проведено сравнение различных полигонов лесного массива по значениям индекса вегетации NDVI, связанного с продуктивностью лесных экосистем, и индекса SWIR, связанного с влажностью. Показано, что не всегда высокие значения лесистости полигона связаны с высокой продуктивностью и высокой влагообеспеченностью лесов. На снимках с интервалом в 20 лет (1995 и 2015 гг.) сохраняется соотношение между значениями показателя лесистости, продуктивности и влагообеспеченности лесов.

Проведен анализ показателя лесистости (индекс лесистости) и показателя разности между 1 классом (леса) и 2 классом (пустоши). Коэффициент корреляции между ними составил 0,99996. Показано, что с увеличением лесистости возрастает доля кластеров со средними значениями спектральной яркости. Если до значений коэффициента лесистости 0,547 преобладают пиксели с максимальным и минимальным значением спектральной яркости, то после значения коэффициента лесистости 0,577 и выше преобладают классы с пикселями средних значений спектральной яркости.

Проведено исследование серий полигонов с изменяющимся масштабом для определения критериев подобия, однородности лесных массивов, оценки густоты древостоя. Показано, что чем выше густота древостоя, тем больше разность между 1 классом (леса) и 2 классом (пустоши).

Определение F-теста на схожесть массивов данных позволило оценить, насколько однородны 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 разных полигонов при классификации на 10 классов между неоднородными и однородными массивами. Причем разные классы резко различаются по значениям дисперсии, среднего и стандартного отклонений. Для однородного массива (редкостойный лиственничник) наибольшие значения дисперсии отмечены для 3, 4, 6 классов, для неоднородного массива (смешанный лес) наибольшие значения дисперсии характерны для 4, 5, 7 классов.

Литература

1. Мониторинг биологического разнообразия лесов России: методология и методы. Под ред. А. С. Исаева / Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН. – М.: Наука, 2008. – 453 с.

2. Исаев А. С., Князева С. В., Пузаченко М. Ю., Черненькова Т. В. Использование спутниковых данных для мониторинга биоразнообразия лесов // Исследование Земли из космоса. – 2009. – № 2. – С. 1-12.

3. Толкач И. В. Методы основных таксационно-дешифровочных показателей на цифровых снимках // Труды БГТУ. – 2012. – № 1. – С. 63-65.

4. Литинский П. Ю. Трехмерное моделирование структуры и динамики таежных ландшафтов. – Петрозаводск: Карельский научный центр. – 2007. – 107 с.

5. Николаев В. А. Космическое ландшафтоведение: Учебное пособие. – М: Изд-во Моск. ун-та, 1993. – 81 с.

6. Лабутина И. А, Балдина Е. А. Практикум по курсу «Дешифрирование аэрокосмических снимков»: Учебное пособие. – М.: Географический факультет МГУ, 2013. – 168 с.

7. Козодеров В. В., Кондранин Т. В. Методы оценки состояния почвенно-растительного покрова по данным оптических систем дистанционного аэрокосмического зондирования. – М: МФТИ, 2008. – 222 с.

8. Кочуб Е. В. Анализ методов обработки материалов дистанционного зондирования Земли // Вестник Полоцкого государственного университета, серия F. Строительство. Прикладные науки. Геодезия. – 2012. – № 16. – С. 132-140.

9. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. – Москва: Техносфера, 2010. – 560 с.

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

11. ArcView Image Analisis. Руководство пользователя. – М : Дата+, 1998. – 270 с.

12. Hudak A. T., Morgan P., Bobbitt M. J., Smith M. S., Lewis S. A., Lentile L. B., Robichand P. R., Clark J. T., McKinley R. A. Relationship of multispectral satellite imagery to immediate fire effects// Journal of Fire ecology. – 2007. – № 3 . – P. 64-90.

13. Escuin S., Navarro R., Fernandez P. Fire severity assessment by using NBR (Norm alized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from Landsat TM/ETM images // Jounal of Remote Sensing. – 2008. – № 29. – P. 1053-1073.

14. Шихов А., Маракулин Я. Оценка последствий лесных пожаров в 2010 году в Пермском крае. Интернет-публикация: http://gis-lab.info/qa/fires-perm.html.

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

16. Рожков Ю. Ф., Кондакова М. Ю. Количество классов при проведении кластерного анализа космических снимков при мониторинге состояния лесов // Наука и образование. – 2017. – № 3(87). – С. 130-140.

References

1. Monitoring biologicheskogo raznoobraziia lesov Rossii: metodologiia i metody. Pod red. A. S. Isaeva / Tsentr po problemam ekologii i produktivnosti lesov RAN. – M.: Nauka, 2008. – 453 s.

2. Isaev A. S., Kniazeva S. V., Puzachenko M. Iu., Chernen'kova T. V. Ispol'zovanie sputnikovykh dannykh dlia monitoringa bioraznoobraziia lesov // Issledovanie Zemli iz kosmosa. – 2009. – № 2. – S. 1-12.

3. Tolkach I. V. Metody osnovnykh taksatsionno-deshifrovochnykh pokazatelei na tsifrovykh snimkakh// Trudy BGTU. – 2012. – № 1. – S. 63-65.

4. Litinskii P. Iu. Trekhmernoe modelirovanie struktury i dinamiki taezhnykh landshaftov. – Petrozavodsk: Karel'skii nauchnyi tsentr. – 2007. – 107 s.

5. Nikolaev V. A. Kosmicheskoe landshaftovedenie: Uchebnoe posobie. – M: Izd-vo Mosk. un-ta, 1993. – 81 s.

6. Labutina I. A, Baldina E. A. Praktikum po kursu «Deshifrirovanie aerokosmicheskikh snimkov»: Uchebnoe posobie. – M.: Geograficheskii fakul'tet MGU, 2013. – 168 s.

7. Kozoderov V. V., Kondranin T. V. Metody otsenki sostoianiia pochvenno-rastitel'nogo pokrova po dannym opticheskikh sistem distantsionnogo aerokosmicheskogo zondirovaniia. – M: MFTI, 2008. – 222 s.

8. Kochub E. V. Analiz metodov obrabotki materialov distantsionnogo zondirovaniia Zemli // Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta, seriia F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki. Geodeziia. – 2012. – № 16. – S. 132-140.

9. Shovengerdt R. A. Distantsionnoe zondirovanie. Modeli i metody obrabotki izobrazhenii. – Moskva: Tekhnosfera, 2010. – 560 s.

10. Rozhkov Iu. F., Kondakova M. Iu. Monitoring sostoianiia lesov s ispol'zovaniem klasternogo analiza pri deshifrirovanii kosmicheskikh snimkov srednego i vysokogo razresheniia // Nauka i obrazovanie. – Iakutsk, 2016. – № 3. – S. 95-101.

11. ArcView Image Analisis. Rukovodstvo pol'zovatelia. – M : Data+, 1998. – 270 s.

12. Hudak A. T., Morgan P., Bobbitt M. J., Smith M. S., Lewis S. A., Lentile L. B., Robichand P. R., Clark J. T., McKinley R. A. Relationship of multispectral satellite imagery to immediate fire effects// Journal of Fire ecology. – 2007. – № 3 . – P. 64-90.

13. Escuin S., Navarro R., Fernandez P. Fire severity assessment by using NBR (Norm alized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from Landsat TM/ETM images // Jounal of Remote Sensing. – 2008. – № 29. – P. 1053-1073.

14. Shikhov A., Marakulin Ia. Otsenka posledstvii lesnykh pozharov v 2010 godu v Permskom krae. Internet-publikatsiia: http://gis-lab.info/qa/fires-perm.html.

15. Rozhkov Iu. F., Kondakova M. Iu. Otsenka protsessa vosstanovleniia lesov posle pozhara s ispol'zovaniem klasternogo analiza pri deshifrirovanii kosmicheskikh snimkov // Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta. – 2017. – № 2(58). – S. 38-49.

16. Rozhkov Iu. F., Kondakova M. Iu. Kolichestvo klassov pri provedenii klasternogo analiza kosmicheskikh snimkov pri monitoringe sostoianiia lesov // Nauka i obrazovanie. – 2017. – № 3(87). – S. 130-140.