

ОБЩАЯ БИОЛОГИЯ

Экология

УДК 57.036:504.064.37

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-2-6

Оценка нарушенности лесных экосистем и их восстановления после пожаров в Олекминском заповеднике (Россия) по космическим снимкам Landsat

Ю.Ф. Рожков^{1, *}, М.Ю. Кондакова²

¹ФГБУ «Государственный природный заповедник «Олекминский», Олекминск, Россия

²ФГБУ «Гидрохимический институт», Ростов-на-Дону, Россия

*olekmazar-nauka@yandex.ru

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 лесов площадью 34,484 км² (масштаб 1:24000) с различной нарушенностью от пожаров. Затем были сохранены полигоны по трем уровням детализации – 4, 16, 64 с масштабами 1:12000, 1:6000, 1:3000. При дешифрировании проводилась неуправляемая классификация фрагмента, полигонов методом ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique) на 2, 4 класса. Были построены кривые распределения значений индексов лесистости для полигонов 3-го уровня детализации. Характер кривых распределения значений нарушенных полигонов отличаются от нормального, тогда как у ненарушенных близки к нормальному распределению. Расчет коэффициента корреляции между рядами значений индексов по годам показал, что на всех трех уровнях детализации коэффициент корреляции ненарушенного полигона в 5–10 раз выше, чем нарушенного. Дана оценка нарушенности лесных экосистем по показателям тематической разности пикселей и индексу лесистости. По результатам классификации на четыре класса 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 детализации.

Ключевые слова: дешифрирование космических снимков, классификация Isodata, индексы лесистости, дисперсия, F-тест.

Введение

Для целей мониторинга состояния лесных экосистем наиболее эффективно использование возможностей дистанционных методов. Получили широкое распространение методы оценки нарушенности лесов в результате как антропогенного воздействия, так и стихийных бедствий, в том числе: мониторинг гибели лесов от лесных пожаров [1, 2], лесопатологический мониторинг повреждения от вредителей [3, 4], мониторинг лесозаготовок, незаконных рубок, буреломов, ветровалов в результате стихий [5, 6], выявление зон влияния антропогенного загрязнения горно-

добывающих комбинатов [7–9], газодобывающих и нефтедобывающих предприятий [10, 11] на лесные экосистемы. На основании анализа космических снимков предложены шкалы нарушенности лесов из шести категорий (от ненарушенных до разрушенных) [12] и четырех категорий (средневзвешенная категория нарушенности лесов – от здоровых до усыхающих, погибших) [1].

При определении нарушенности лесных экосистем от пожаров широко используются оценка по хлорофильному индексу – MTCI [13], эмиссии углерода в результате пожаров [14–16], индексу вегетации NDVI, нормализованному ин-

дексу гарей – NBR [17, 18], коротковолновому индексу SWVI [2], расчеты коэффициентов отражения в инфракрасном спектральном диапазоне [19]. В основу перечисленных индексов заложена закономерная связь уменьшения концентрации хлорофилла, продуктивности, биомассы растений с увеличением нарушенности экосистем. Для этих показателей характерна зависимость спектральной яркости от различных факторов, связанных с условиями съемки: сезонностью, состоянием атмосферы, типом съемочной камеры и ее ориентацией. Этому влиянию менее подвержены методы, основанные на оценке состояния экосистемы по изменению ее структуры [20–22]. При этом оцениваются упрощения структурной организации экосистемы в результате экстремального воздействия, уменьшение ее биоразнообразия, разрушение структурно-функциональных связей. Это разрушение структурной организации экосистемы обнаруживается при использовании кластерного анализа – классификации «без обучения» методом ISODATA. Подобный метод выбран для оценки нарушения упорядоченности ландшафтов после пожаров или

других воздействий, разрушающих структуру экосистемы.

Целью настоящего исследования было сравнение лесных массивов с различной нарушенностью после пожара с интервалом во времени в 20 лет с использованием классификации «без обучения» методом ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technigue) для мультиспектральных снимков.

Материалы и методы

При осуществлении непрерывного мониторинга за состоянием бореальных лесов использовалось дешифрирование временных серий мультиспектральных (летних, июль–август) снимков Landsat, сделанных в период с 1995 по 2016 г., полученных в общедоступных сервисах (<http://glovis.usgs.gov>). Исследования проводились на территории Олекминского заповедника Юго-Западной Якутии. Для сравнения были выбраны четыре полигона площадью 34,484 км² (масштаб 1:24000) с доминированием лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* Rupr.), сосны сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour), но с разной нарушенностью от пожара (рис. 1). Первый полигон, расположен-

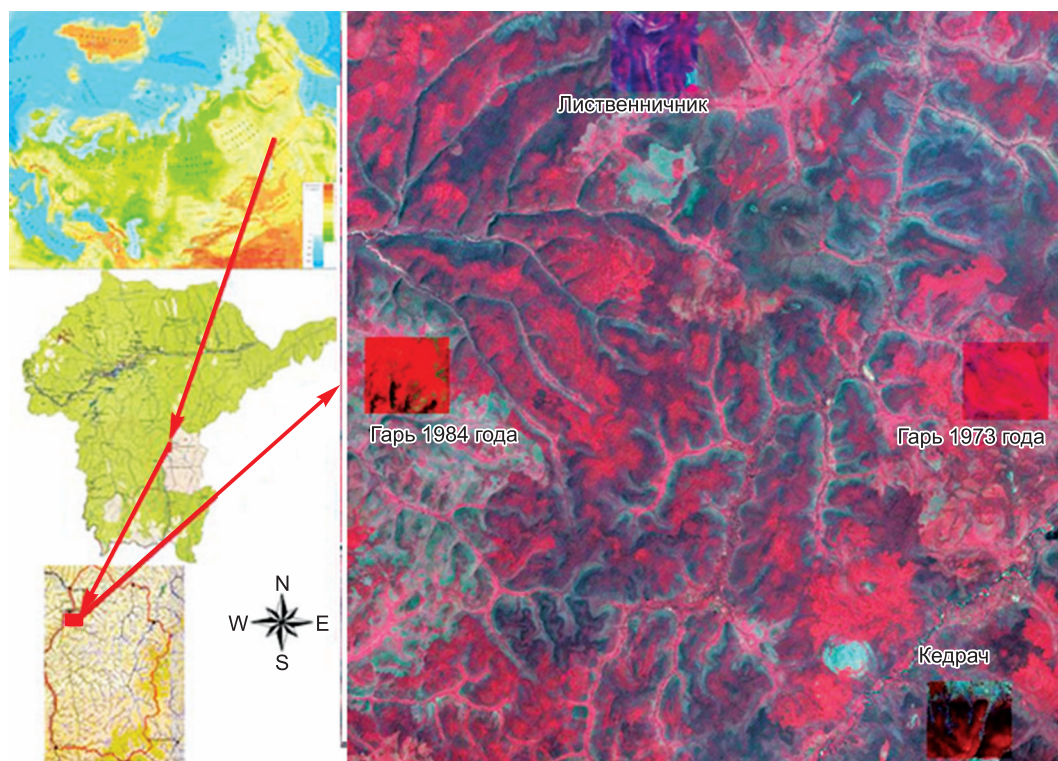


Рис. 1. Район исследования.

Fig. 1. Study area.

1=1-1 1=1	1=1-2	1=2-1 1=2	1=2-2	2=1-1 2=1	2=1-2	2=2-1 2=2	2=2-2
1=1-3	1=1-4 1	1=2-3	1=2-4	2=1-3	2=1-4 2	2=2-3	2=2-4
1=3-1 1=3	1=3-2	1=4-1 1=4	1=4-2	2=3-1 2=3	2=3-2	2=4-1 2=4	2=4-2
1=3-3	1=3-4	1=4-3	1=4-4	2=3-3	2=3-4	2=4-3	2=4-4
3=1-1 3=1	3=1-2	3=2-1 3=2	3=2-2	4=1-1 4=1	4=1-2	4=2-1 4=2	4=2-2
3=1-3	3=1-4 3	3=2-3	3=2-4	4=1-3	4=1-4 4	4=2-3	4=2-4
3=3-1 3=3	3=3-2	3=4-1 3=4	3=4-2	4=3-1 4=3	4=3-2	4=4-1 4=4	4=4-2
3=3-3	3=3-4	3=4-3	3=4-4	4=3-3	4=3-4	4=4-3	4=4-4

Рис. 2. Разбивка снимка Landsat масштаба 1:24000 на полигоны (4, 16, 64 полигона). Лесной массив с гарью 1984 г. (снимок 1995 г.).

Fig. 2. Breakdown of a Landsat image at a scale of 1: 24000 into polygons (4, 16, 64 polygons). Forest after a fire in 1984 (image dt. 1995).

ный в истоке р. Бедерях, не нарушен лесным пожаром. Второй, расположенный в долине р. Холболах, нарушен лесным пожаром 1984 г. Третий, расположенный в долине р. Амга, нарушен лесным пожаром 1973 г. Четвертый, расположенный в истоке р. Олорбох, не нарушен лесным пожаром. Каждый из выбранных полигонов был разбит на четыре полигона масштаба 1:12000. Далее были получены 16 полигонов с масштабом 1:6000. Способ получения полигонов разных масштабов описан ранее [23]. На третьем уровне детализации продолжалось разбиение на тетрады. Получилось 64 полигона масштаба 1:3000 (рис. 2, 3).

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). Для определения показателей, с помощью которых осуществлялся мониторинг состояния лесов, был выбран инструмент кластерного анализа: классификация ISODATA. Была проведена классификация снимков на два, четыре класса. Классификация на два класса позволяет определить

индекс, характеризующий лесистость [24], который определяется как отношение площади, покрытой лесной растительностью, к общей площади: $D = df/S$, где D – лесистость; df – площадь, покрытая лесной растительностью, m^2 ; S – общая площадь территории, m^2 .

Классификация на четыре класса была использована при определении тематической разности [20] и статистическом анализе. Проводилось сравнение с помощью показателей разности и подобия полигонов – 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 1:24000. Результаты классификации на всех четырех уровнях детализации представлены в табл. 1.

Результаты и обсуждение

Особенности распределения полигонов лесного массива по значениям индекса лесистости. Полигоны с ненарушенными лесными массивами с доминированием лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii Rupr.*) и сосны сибирской



Рис. 3. Разбивка снимка Landsat масштаба 1:24000 на полигоны (4, 16, 64 полигона). Лесной массив с доминированием лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* Rupr.) (снимок 1995 г.).

Fig. 3. Breakdown of a Landsat image at a scale of 1: 24000 into polygons (4, 16, 64 polygons). Forest area with dominance of larch Gmelin (*Larix gmelinii* Rupr.) (image dt. 1995).

(*Pinus sibirica* Du Tour) имеют более высокие значения индекса лесистости по сравнению с нарушенным как в 1995, так и в 2016 г. Сравните 0,791, 0,689 для ненарушенных полигонов и 0,387 и 0,470 для нарушенного (табл. 2). Отмечено увеличение значений индекса лесистости по мере восстановления леса после пожара. За 21 год индекс лесистости нарушенного полигона увели-

чился с 0,387 до 0,470, тогда как у ненарушенных полигонов он увеличился незначительно с 0,758 до 0,791 у лиственничника и с 0,615 до 0,689 для кедрача. Кроме того, следует отметить уменьшение разброса значений индекса для нарушенного полигона на всех трех уровнях детализации (с 0,168 до 0,107 на первом уровне, с 0,331 до 0,296 – на втором, с 0,844 до 0,664 – на

Таблица 1

**Результаты пересчета результатов классификации снимка Landsat
на 4 класса для разных масштабов**

Table 1

**Recalculation results of Landsat image classification
into four classes for different scales**

Номер полигона	Лиственничник ненарушенный				Гарь 1984 г			
	исходный	1	1 = 1	1 = 1 – 1	исходный	1	1 = 1	1 = 1 – 1
масштаб	1:24000	1:12000	1:6000	1:3000	1:24000	1:12000	1:6000	1:3000
1 кл.	8857	10644	7546	12879	6852	7516	8460	5161
2 кл.	12884	14436	10583	9355	10291	10480	13066	15663
3 кл.	9706	7984	13327	6728	11470	10780	10600	12478
4 кл.	6869	5252	6860	9355	9703	9540	6190	5014
Сумма пикселей	38316	38316	38316	38316	38316	38316	38316	38316

Характеристика полигонов лесных массивов по значениям индекса лесистости

Table 2

Characteristics of forest sites according to forest index values

Масштаб	Лиственничник ненарушенный, 1995 г.			Лиственничник ненарушенный, 2016 г.	
	Диапазон значений	Разброс значений	К корреляции между массивами по годам	Диапазон значений	Разброс значений
1: 24000	0,758	один полигон		0,791	один полигон
1: 12000	0,578–0,802	0,224 из 4	0,968	0,617–0,791	0,174 из 4
1: 6000	0,405–0,806	0,401 из 16	0,248	0,512–0,819	0,307 из 16
1: 3000	0,323–0,873	0,550 из 64	0,133	0,375–0,844	0,469 из 64
	Гарь 1984 г. в 1995 г.			Гарь 1984 г. в 2016 г.	
1: 24000	0,387	один полигон		0,470	один полигон
1: 12000	0,232–0,400	0,168 из 4	0,166	0,446–0,553	0,107 из 4
1: 6000	0,219–0,550	0,331 из 16	0,141	0,372–0,668	0,296 из 16
1: 3000	0,077–0,921	0,844 из 64	0,043	0,229–0,893	0,664 из 64
	Массив сосны сибирской, 1995 г.			Массив сосны сибирской, 2016 г.	
1: 24000	0,615	один полигон		0,689	один полигон
1: 12000	0,370–0,658	0,288 из 4	0,964	0,355–0,689	0,344 из 4
1: 6000	0,348–0,795	0,447 из 16	0,719	0,333–0,742	0,409 из 16
1: 3000	0,279–0,834	0,555 из 64	0,574	0,295–0,809	0,514 из 64

третьем уровне). Расчет коэффициента корреляции между рядами значений индекса лесистости по годам показал, что на всех трех уровнях детализации коэффициент корреляции ненарушенного полигона в 5–10 раз выше, чем нарушенного (сравните 0,964 и 0,166 – для первого уровня, 0,719 и 0,141 – для второго и 0,574 и 0,043 – для третьего уровня) (табл. 2). Подобная картина объясняется тем, что в случае нарушенного полигона по меньшей мере два процесса – функционирование лесной экосистемы и восстановление после пожара накладываются друг на друга, а в случае ненарушенного полигона выделяется только процесс функционирования экосистемы.

Еще более показательное сравнение кривых распределения значений индекса лесистости для нарушенных и ненарушенных полигонов. В случае нарушенных полигонов (рис. 4) спустя 10–20 лет после пожара кривые распределения значений отличаются от кривой нормального распределения. Имеются аномалии в разбросе минимальных и максимальных значений и несколько вершин. По мере восстановления леса кривые распределения значений выравниваются и спустя 32 года после пожара 1984 г. и 43 года после пожара 1973 г. уже близки к кривым нормального распределения. Это говорит о восста-

новлении лесных экосистем после нарушений, вызванных лесным пожаром. В случае ненарушенных полигонов кривые распределения значений индекса лесистости в 1995 и 2016 гг. близки к кривой нормального распределения и незначительно различаются между собой (рис. 5). Что согласуется с утверждением [25], согласно которому в случае параметрических способов классификации используют закон нормального (гауссова) распределения, типичного для яркостей природных объектов.

Оценка нарушенности лесных экосистем и восстановления после пожара по изменению индекса лесистости и тематической разности пикселей. Ранее нами [20] была установлена связь между значениями индекса лесистости и разностью пикселей при классификации полигонов на два класса. Было показано, что все положительные значения разности между 1-м и 2-м классом соответствуют значениям индекса лесистости выше 0,5, а все отрицательные значения разности лежат в области значений индекса лесистости менее 0,5. Расчеты тематической разности при классификации на четыре класса показали такую же связь. Ненарушенные полигоны характеризуются значениями индекса лесистости более 0,5 и положительными значениями темати-

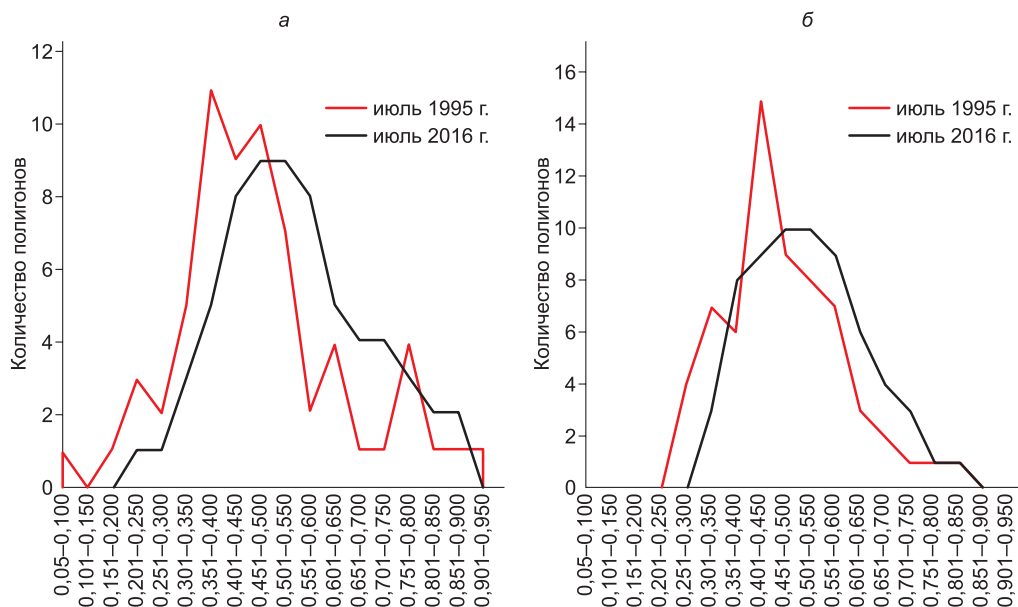


Рис. 4. Распределение полигонов масштаба 1:3000 (64 шт.) по значениям индексов лесистости: *a* – гарь 1985 г.; *б* – гарь 1973 г.

Fig. 4. Polygons distribution of scale 1: 2000 (64 pcs.) from the values of the productivity index: *a* – burned-out 1985; *б* – burned-out 1973.

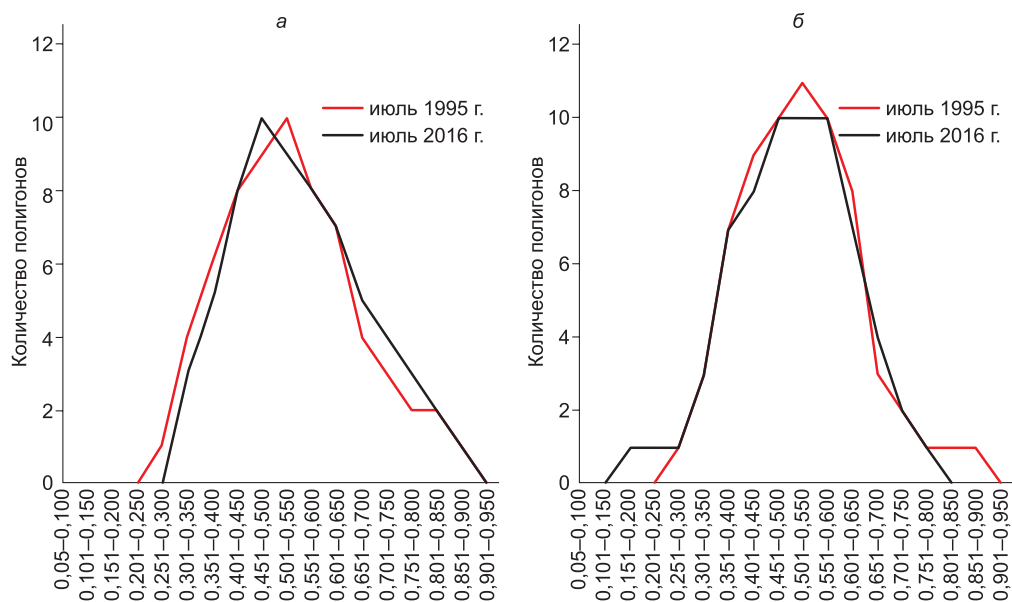


Рис. 5. Распределение полигонов масштаба 1:3000 (64 шт.) по значениям индексов лесистости: *a* – ненарушенный лиственничник в истоке р. Бедердах; *б* – ненарушенный массив сосны сибирской в истоке р. Олорбох.

Fig. 5. Polygons distribution of scale 1: 3000 (64 pcs.) from the values of the forest cover index: *a* – undisturbed larch forest at the source of the river Bederdakh, 1995; *б* – Undisturbed massif of Siberian pine at the source of the river Olorboch.

ческой разности, тогда как все значения индекса лесистости нарушенных экосистем лежат в области менее 0,5 и имеют отрицательные значения тематической разности пикселей (табл. 3).

Чем более нарушены экосистемы после пожара, тем меньше значения индекса лесистости и тематической разности пикселей. Например, для гари 1984 г. в 1995 г. на втором уровне дета-

Таблица 3

**Связь между индексом лесистости и тематической разностью
при сравнении нарушенных и ненарушенных лесных экосистем**

Table 3

**Relationship between forest cover index and thematic difference
when comparing disturbed and undisturbed forest ecosystems**

Показатель	Ненарушенный лиственный лес, 1995 г.					Гарь 1984 года в 1995 году				
	Номер полигона									
	1=24	12=1	12=2	12=3	12=4	1=24	12=1	12=2	12=3	12=4
1 класс	8857	10644	10420	8836	5148	6852	7516	7980	5124	6872
2 класс	12884	14436	13116	13728	13172	10291	10480	6816	11304	9780
3 класс	9706	7984	9508	10440	14864	11470	10780	11392	13092	11024
4 класс	6869	5252	5272	5312	5132	9703	9540	12128	8796	10640
Сумма пикселей	38316	38316	38316	38316	38316	38316	38316	38316	38316	38316
Тематическая разность пикселей	19804	23124	14700	12036	2012	−8670	−7660	−12908	−11120	−8156
Индекс лесистости	0,758	0,802	0,692	0,670	0,508	0,387	0,400	0,332	0,356	0,394

Таблица 4

**Сравнительная динамика процесса лесовосстановления на гарях
по изменению индекса лесистости**

Table 4

**Comparative dynamics of the process of reforestation in burned-out areas
according to the change in the forest cover index**

Год	Гарь 1984 года, долина р. Холболах					Гарь 1973 года, долина р. Амга				
	Номер полигона									
	1=24	12=1	12=2	12=3	12=4	1=24	12=1	12=2	12=3	12=4
1995	0,387	0,400	0,332	0,356	0,393	0,382	0,321	0,411	0,360	0,461
2001	0,409	0,437	0,391	0,420	0,394	0,401	0,395	0,424	0,364	0,469
2006	0,411	0,458	0,510	0,431	0,397	0,423	0,450	0,438	0,368	0,474
2013	0,463	0,482	0,548	0,452	0,417	0,444	0,498	0,446	0,371	0,485
2016	0,470	0,491	0,553	0,485	0,446	0,467	0,535	0,456	0,374	0,492
Δ за 21 год	0,083	0,091	0,221	0,129	0,053	0,085	0,214	0,045	0,014	0,031

лизации наиболее нарушен полигон 3=4 со значениями индекса лесистости 0,219 и тематической разности –21560 пикселей. Для гари 1973 г. в 1995 г. наиболее нарушен полигон 4=1 со значениями индекса лесистости 0,300 и тематической разностью –16399 пикселей. Наименее нарушен после пожара 1984 г. полигон 1=2 с индексом лесистости 0,541 и тематической разностью +3169, а для пожара 1973 г. в 1995 г. наименее нарушен полигон 2=2 с индексом лесистости 0,588 и тематической разностью пикселей +6762 (табл. 3).

Сравнение нарушенных полигонов по динамике лесовосстановления подтвердило указан-

ную [20] зависимость скорости этого процесса от уровня нарушенности полигона. Наиболее нарушенные полигоны восстанавливаются со значительно большей скоростью, чем менее нарушенные. Полигоны с наименьшими значениями индекса лесистости в 1995 г. (0,332 для гари 1984 г. и 0,321 для гари 1973 г.) в 2016 г. характеризуются наибольшими значениями индекса лесистости – 0,553 и 0,535 соответственно (табл. 4). Для полигонов с наибольшими значениями индекса лесистости в 1995 г. (0,393 для гари 1984 г. и 0,461 для гари 1973 г.) характерна низкая динамика лесовосстановления – 0,053 и 0,031 за период с 1995 по 2016 г. соответственно. Это в

Сравнение полигонов первого уровня детализации по статистическим характеристикам

Table 5

Comparison of polygons of the first level detalization according to statistical characteristics

Номер полигона	Дисперсия генеральной совокупности				F-тест на подобие			
	Гарь 1973 года		Ненарушенный лиственный		Гарь 1973 года		Ненарушенный лиственный	
	1995 г.	2016 г.	1995 г.	2016 г.	1995 г.	2016 г.	1995 г.	2016 г.
12=1	9366454	6933602	8099521	8506007	0,831	0,683	0,482	0,851
12=2	9706138	6410421	6322185	9391844	0,715	0,737	0,677	0,746
12=3	14591702	7821263	6939925	10716064	0,327	0,751	0,596	0,624
12=4	10101354	8984139	12381873	17226265	0,440	0,796	0,264	0,322

5–7 раз меньше, чем у сильнонарушенных полигонов.

Сравнение полигонов лесных массивов с помощью статистических методов. Были проведены расчеты статистических показателей сходства и различия полигонов – теста Фишера (F-тест) и дисперсии генеральной совокупности на разных уровнях детализации. На первом уровне детализации сравнение первой тетрады с исходным полигоном масштаба 1:24000 показало (табл. 5), что по результатам классификации на четыре класса в ненарушенном лиственном и гари 1973 г. наименее подобны исходным полигонам полигоны 12=4, 12=3. Для них характерны минимальные значения F-теста (0,264 – в 1995 г. и 0,322 – в 2016 г. для ненарушенного лиственного; 0,327 и 0,440 – в 1995 г. – для зарастающей гари), а также наибольшие значения дисперсии (14591702, 10101354 для гари в 1995 г. и 10716064, 17226265 для ненарушенного лиственного в 2016 г.). Наиболее похожи на исходный полигон в ненарушенном лиственном и зарастающей гари – полигоны 12=1 и 12=2 с наибольшими значениями F-теста и наименьшими значениями дисперсии. Следует отметить, что по мере восстановления лесов после пожара наименее подобные исходному полигону полигоны 12=3 и 12=4 стали более похожи на него. Это выразилось в увеличении значений F-теста и уменьшении дисперсии в 2016 г. по сравнению с 1995 г.

Сравнение тетрад с разным уровнем детализации показало наличие переходных коэффициентов при переходе между уровнями. Ранее [23] нами было отмечено, что «величина переходных

коэффициентов при переходе между уровнями детализации не зависит от изменений дисперсии в пределах тетрады, а является разностью между средними значениями дисперсий каждого из уровней детализации». При сравнении нарушенных и ненарушенных полигонов также отмечено наличие переходных коэффициентов между уровнями детализации (табл. 6, 7). Они имеют как положительные, так и отрицательные значения и являются разностью между средними значениями дисперсий каждой из тетрад.

Кроме того, расчет переходных коэффициентов при переходе между дисперсиями полигонов первого уровня детализации и исходными полигонами масштаба 1:24000 показал, что разность дисперсий самих полигонов и дисперсии исходного полигона в 2 раза больше разности дисперсий этих полигонов с исходным полигоном и дисперсии исходного полигона (табл. 8).

Заключение

В результате использования кластерного анализа в дешифрировании снимков Landsat лесных экосистем Олекминского заповедника была дана сравнительная характеристика четырех лесных массивов площадью 34,484 км² – двух нарушенных после пожаров 1984 и 1973 гг. и двух ненарушенных с доминированием лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii Rupr.*) и сосны сибирской (*Pinus sibirica Du Tour*) на трех уровнях детализации на 4, 16, 64 полигона. Показано, что кривые распределения полигонов по значениям индексов лесистости у ненарушенных полигонов близки к кривым нормального распределения, а

Таблица 6

Сравнение тетрад с разным уровнем детализации по показателю дисперсии генеральной совокупности (полигоны 1=1, 2, 3, 4; 1=1-1, 2, 3, 4) для гари 1973 года (снимок 1995 г.)

Table 6

Comparison of tetrads with different levels of detail by indicator of the dispersion (polygons 1=1, 2, 3, 4; 1=1-1, 2, 3, 4) burned-out 1973 (image dt. 1995)

Детализация 3-го уровня					
дисперсия с полигоном 1=1	разность дисперсий	дисперсия с 1 полигоном	разность дисперсий	дисперсия с исходным полигоном	номер полигона
5302030	-1907331	7209361	-2356995	9566356	1=1-1
4769351	-1907331	6676682	-2356995	9033678	1=1-2
34710205	-1907331	36617536	-2356995	38974531	1=1-3
11019859	-1907331	12927190	-2356995	15284185	1=1-4
5302030	-1907331	7209361	-2356995	9566356	средн.
Детализация 2-го уровня					
		дисперсия с 1 полигоном	разность дисперсий	дисперсия с исходным полигоном	Номер полигона
		5102128	-2356995	7459123	1=1
		9587994	-2356995	11944990	1=2
		8955130	-2356995	11312125	1=3
		4618244	-2356995	6975239	1=4
		7065874	-2356995	9422869	средн.

Таблица 7

Сравнение тетрад с разным уровнем детализации по показателю дисперсии генеральной совокупности (полигоны 1=1, 2, 3, 4; 1=1-1, 2, 3, 4) для ненарушенного лиственничника (снимок 1995 г.)

Table 7

Comparison of tetrads with different levels of detail by indicator of the dispersion (polygons 1=1, 2, 3, 4; 1=1-1, 2, 3, 4) for undisturbed larch forest (images dt. 1995)

Детализация 3-го уровня					
дисперсия с полигоном 1=1	разность дисперсий	дисперсия с полигоном -1	разность дисперсий	дисперсия с исходным полигоном	номер полигона
3727987	-4410836	8138823	3398386	4740437	1=1-1
10081130	-4410836	14491966	3398386	11093580	1=1-2
5862808	-4410836	10273644	3398386	6875257	1=1-3
6657207	-4410836	11068043	3398386	7669657	1=1-4
6582283	-4410836	10993119	3398386	7594733	средн.
Детализация 2-го уровня					
		дисперсия с полигоном -1	разность дисперсий	дисперсия с исходным полигоном	Номер полигона
		7087071	3398386	3688685	1=1
		13419114	3398386	10020727	1=2
		15940500	3398386	12542114	1=3
		12155119	3398386	8756733	1=4
		12150451	3398386	8752065	средн.

**Сравнение тетрад первого уровня детализации
по показателю дисперсии генеральной совокупности
для нарушенного и ненарушенного полигонов (снимок 1995 г.)**

Table 8

**Comparison of the first level detalization tetrads by indicator of general dispersion
for disturbed and undisturbed polygons (image dt.1995)**

Гарь 1973 г. в 1995 г.						
дисперсия исходного полигона	разность дисперсий	дисперсия полигонов первого уровня	номер полигона	дисперсия с исходным полигоном	разность дисперсий	дисперсия исходного полигона
11723450	-4713991	7009459	12=1	9366454	-2356995	11723450
11723450	-4034623	7688827	12=2	9706138	-2017311	11723450
11723450	5736506	17459955	12=3	14591702	2868253	11723450
11723450	-3244191	8479259	12=4	10101354	-1622095	11723450
11723450	-1564075	10159375	ср.	10941412	-782037	11723450
Ненарушенный лиственничник в 1995 г.						
дисперсия исходного полигона	разность дисперсий	дисперсия полигонов первого уровня	номер полигона	дисперсия с исходн. полигоном	разность дисперсий	дисперсия исходного полигона
4701135	6796773	11497907	12=1	8099521	3398386	4701135
4701135	3242101	7943235	12=2	6322185	1621050	4701135
4701135	4477581	9178715	12=3	6939925	2238790	4701135
4701135	15361477	20062611	12=4	12381873	7680738	4701135
4701135	7469483	12170617	ср.	8435876	3734741	4701135

кривые для массивов, нарушенных после пожаров, отличаются от нормального распределения (имеются «горбы», отсутствует вершина и др.), что говорит о нарушении структурной организации экосистемы спустя 10–20 лет после пожара. По мере восстановления леса кривые распределения значений выравниваются и спустя 32 года после пожара 1984 г. и 43 года после пожара 1973 г. уже близки к кривым нормального распределения. Это говорит о восстановлении лесных экосистем после нарушений, вызванных лесным пожаром.

Кроме того, определено различие в коэффициентах корреляции между рядами полигонов разных уровней детализации с интервалом в 21 год. На всех трех уровнях детализации коэффициент корреляции ненарушенного полигона в 5–10 раз выше, чем у нарушенного.

В качестве критериев оценки нарушенности лесных экосистем были рассмотрены показатели тематической разности пикселей и индекс лесистости. Чем меньше значения тематической разности и индекса лесистости, тем более нарушена лесная экосистема.

Кроме того, подтверждено утверждение, что чем более нарушены полигоны, тем быстрее идет процесс лесовосстановления.

Каждый полигон тетрады с масштабами 1:3000, 1:6000, 1:12000 подвергался статистической обработке с определением показателей разности и подобия полигонов – дисперсии генеральной совокупности и F-теста на подобие. На первом уровне детализации сравнение первой тетрады с исходным полигоном масштаба 1:24000 показало, что по результатам классификации на четыре класса в ненарушенном лиственничнике и гари 1973 г. наименее подобны исходным полигонам полигоны 12=3 и 12=4. Для них характерны минимальные значения F-теста и наибольшие значения дисперсии. Наиболее похожи на исходный полигон в ненарушенном лиственничнике и в зарастающей гари – полигоны 12=1 и 12=2 с наибольшими значениями F-теста и наименьшей дисперсией. Отмечено, что по мере зарастания гари полигоны 1-го уровня детализации становятся более подобны исходному полигону. Это подтверждается увеличением значений F-теста и уменьшением ди-

сперсии. По показателю дисперсии генеральной совокупности было проведено сравнение тетрад разного уровня детализации. Показано, что дисперсия тетрады каждого уровня изменяется на постоянную величину при переходе между уровнями детализации независимо от значений дисперсии в пределах тетрады, а также даны были даны расчеты переходных коэффициентов при переходе между уровнями детализации.

Литература

1. Барталев С.А., Егоров В.А., Крылов А.М., Стыценко Ф.В., Ховратович Т.С. Исследование возможностей оценки состояния поврежденных пожарами лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7, № 3. С. 215–225.
2. Барталев С.А., Стыценко Ф.В., Хвостиков С.А., Луян Е.А. Методология мониторинга и прогнозирования пирогенной гибели лесов на основе данных спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 6. С. 176–193.
3. Маркс А. Мониторинг лесов с помощью группировки спутников Rapid Eye // Геомастика. 2011. № 3. С. 58–66.
4. Чикидов И.И., Борисов Б.З., Исаев А.П. Оценка площади очагов массового размножения сибирского шелкопряда в 1999–2000 гг. в Центральной Якутии по данным Spot Vegetation // Наука и образование. 2010. № 4(60). С. 76–82.
5. Крылов А.М., Владимирова Н.А. Дистанционный мониторинг состояния лесов по данным космической съемки // Геомастика. 2011. № 3. С. 53–57.
6. Шихов А.Н., Перминов С.И., Киселева Е.С. Оценка подверженности бореальных лесов Урала воздействию лесных пожаров и ветровалов по многолетним рядам спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 4. С. 87–102.
7. Василевич М.И., Елсаков В.В., Щанов В.М. Применение спутниковых методов исследований в мониторинге состояния лесных фитоценозов в зоне выбросов промышленного предприятия // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, № 1. С. 30–42.
8. Курбанов Э.А., Воробьев О.Н., Полевицкова Ю.А., Незамаев С.А., Демишева Е.Н. Сравнительный анализ спутниковых снимков высокого разрешения при дешифрировании древостоев, загрязненных отходами силикатного производства // Вестник ПГТУ. 2013. № 2. С. 74–90.
9. Черненко Т.В., Басова Е.В., Бочкарев Ю.Н., Пузаченко М.Ю. Оценка биоразнообразия лесов в зоне влияния горно-металлургического комбината «Североникель» // Лесоведение. 2009. № 6. С. 32–45.
10. Динамика антропогенной деградации ландшафтов Западной Сибири при нефтедобыче на примере Мамонтовского и Южно-Балыкского месторождений: (обзор). М.: Гринпис России, 2012. 45 с.
11. Токарева О.С., Касьянов И.В. Оценка динамики состояния растений-биоиндикаторов атмосферного загрязнения на основе данных дистанционного зондирования // Вестник науки Сибири. 2011. № 1 (1). С. 268–272.
12. Терехин Э.А. Оценка нарушенности лесных экосистем юго-запада Среднерусской возвышенности с применением материалов космических съемок // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 4. С. 112–124.
13. Jadunandan Dash et al. MTCI : The MERIS Terrestrial chlorophyll index // ENVISAT Symposium Proceedings / Austria, Salzburg, 2004.
14. Hall R.J. et al. Modelling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: application to mapping of aboveground biomass and stand volume // Forest Ecology and Management. 2006. No. 225. P. 378–390.
15. Krankina O.N., Harmon M.E., Cohen W.B., Oetter D.R., Zyrina O., Duane M.V. Carbon stores, sinks, and sources in forests of northwestern Russia: can we reconcile forest inventories with remote sensing results? // Climatic change. 2004. No. 67. P. 257–272.
16. Пономарев Е.И., Швецов Е.Г., Литвинцев К.Ю. Калибровка оценок пожарных эмиссий на основе данных дистанционного зондирования // Исследование Земли из космоса. 2018. № 5. С. 41–51.
17. Escuin S., Navarro R., Fernandez P. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from Landsat TM/ETM images // Journal of Remote Sensing. 2008. No. 29. P. 1053–1073.
18. 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. No. 3. P. 64–90.
19. Терехин Э.А. Геоинформационный анализ нарушенности лесных экосистем с применением разновременных спутниковых данных // Геоинформатика. 2017. № 3. С. 56–62.
20. Рожков Ю.Ф., Кондакова М.Ю. Оценка динамики восстановления лесов после пожаров в Оленинском заповеднике (Россия) по космическим снимкам Landsat // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2019. 4(Вып. 1). С. 1–10. <https://dx.doi.org/10.24189/ncr.2019.014>
21. Рожков Ю.Ф., Кондакова М.Ю. Оценка возможности использования показателя симметрии распределения пикселей в мониторинге состояния лесов при дешифрировании космических снимков среднего

и высокого разрешения // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2016. Вып. 1(1). С. 98–107. DOI: 10.24189/ncr.2016.008

22. Рожков Ю.Ф., Кондакова М.Ю. Оценка структурных характеристик лесных экосистем с использованием дешифрирования космических снимков высокого и сверхвысокого разрешений // Вестник СВФУ. 2018. № 1 (63). С. 38–51. DOI:10.25587/SVFU.2018.63.10539

23. Рожков Ю.Ф., Кондакова М.Ю. Сравнительная характеристика лесных массивов с использовани-

ем дешифрирования снимков сверхвысокого разрешения // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020. Т. 25, № 2. С. 125–136. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-10>

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

25. Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В. Аэрокосмические методы географических исследований. М.: Академия, 2004. 336 с.

Поступила в редакцию 15.12.2020

Принята к публикации 21.04.2021

Об авторах

РОЖКОВ Юрий Филиппович, кандидат химических наук, заместитель директора по научной работе, ФГБУ «Государственный природный заповедник «Олекминский», Олекминск 678100, ул. Филатова, 6, Россия,

<https://orcid.org/0000-0002-6830-9130>, olekmazap-nauka@yandex.ru;

КОНДАКОВА Мария Юрьевна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, ФГБУ «Гидрохимический институт», Ростов-на Дону 344090, пр. Стачки, 198, Россия,

Researcher ID: Z-2288-2019; Scopus ID: 36499623700, vesna-dm@mail.ru.

Информация для цитирования

Рожков Ю.Ф., Кондакова М.Ю. Оценка нарушенности лесных экосистем и их восстановления после пожаров в Олекминском заповеднике (Россия) по космическим снимкам Landsat // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021, Т. 26, № 2. С. 94–107. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-2-6>

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-2-6

Evaluation of the disturbance of forest ecosystems and their recovery after wildfire events in the Olekminsky reserve (Russia) using interpretation of Landsat satellite images

Yu.F. Rozhkov^{1,*}, M.Yu. Kondakova²

¹State Nature Reserve «Olekminsky», Olekminsk, Russia

²Hydrochemical Institute, Rostov-on-Don, Russia

*olekmazap-nauka@yandex.ru

Abstract. For the purposes of monitoring the state of forest ecosystems, it is most effective to use the capabilities of remote sensing methods. Fragments of 27.562 km² (scale 1: 16000) of Gmelin larch (*Larix gmelinii* Rupr.) with various disturbances caused by fire were identified on the Landsat ETM + multispectral satellite images of the Olekminsky State Nature Reserve. Then polygons were saved at three levels of detail-4, 16.64 with scales 1: 8000, 1: 4000, 1: 2000. When decrypting, an uncontrolled classification of a fragment and polygons was carried out using the ISODATA method (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique) into 2.4 classes. Distribution curves of the values of forest cover and productivity indices were constructed for the polygons of the 3rd level of detail. The nature of the distribution curves of the values of disturbed polygons differ from the normal one, while in the undisturbed ones they are close to the

normal distribution of the values. Calculation of the correlation coefficient between the series of values of the indices by year showed that at all three levels of detailing the correlation coefficient of an undisturbed polygon is 2–3 times higher than that of a disturbed one. According to the results of classification into 4 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). The results of changes in the variance of the general population and the F-test at different levels of detail are considered.

Key words: satellite image interpretation, Isodata classification, forest cover index, dispersion, F-test.

References

1. Bartalev S.A., Egorov V.A., Krylov A.M., Stycenko F.V., Hovratovich T.S. Issledovanie vozmozhnostej ocenki sostoyaniya povrezhdennykh pozharemi lesov po dannym mnogospektral'nykh sputnikovyykh izmereniy // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2010. Vol. 7, No. 3. P. 215–225.
2. Bartalev S.A., Stycenko F.V., Hvostikov S.A., Lypyan E.A. Metodologiya monitoringa i prognozirovaniya pirogennoj gibeli lesov na osnove dannykh sputnikovyykh nablyudeniy // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2017. Vol. 14, No. 6. P. 176–193.
3. Marks A. Monitoring lesov s pomoshch'yu gruppirovki sputnikov Rapid Eye // *Geomatika*. 2011. No. 3. P. 58–66.
4. Chikidov I.I., Borisov B.Z., Isaev A.P. Ocenka ploshchadi ochagov massovogo razmnozheniya sibirskogo shelkopryada v 1999–2000 gg. v Central'noj YAKutii po dannym Spot Vegetation // *Nauka i obrazovanie*. 2010. No. 4(60). P. 76–82.
5. Krylov A.M., Vladimirova N.A. Distancionnyj monitoring sostoyaniya lesov po dannym kosmicheskoy s"emki // *Geomatika*. 2011. No. 3. P. 53–57.
6. SHihov A.N., Perminov S.I., Kiseleva E.S. Ocenka podverzhennosti boreal'nykh lesov Urala vozdeystviyu lesnykh pozharov i vetrovalov po mnogoletnim ryadam sputnikovyykh nablyudeniy // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2017. Vol. 14, No. 4. P. 87–102.
7. Vasilevich M.I., Elsakov V.V., SHCHanov V.M. Primenenie sputnikovyykh metodov issledovaniy v monitoringe sostoyaniya lesnykh fitocenozov v zone vybrosov promyshlennogo predpriyatiya // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2014. Vol. 11, No. 1. P. 30–42.
8. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Polevshchikova Yu.A., Nezamaev S.A., Demisheva E.N. Sravnitel'nyj analiz sputnikovyykh snimkov vysokogo razresheniya pri deshifirovani drevostoev, zagryaznennykh othodami silikatnogo proizvodstva // *Vestnik PGUTU*. 2013. No. 2. P. 74–90.
9. Chernen'kova T.V., Basova E.V., Bochkarev Yu.N., Puzachenko M.Yu. Ocenka bioraznoobraziya lesov v zone vliyaniya gorno-metallurgicheskogo kombinata «Severonikel'» // *Lesovedenie*. 2009. No. 6. P. 32–45.
10. Dinamika antropogennoj degradacii landshtaftov Zapadnoj Sibiri pri nefte dobyche na primere Mamontovskogo i Yuzhno-Balyksskogo mestorozhdeniy: (obzor). M.: Grinpis Rossii, 2012. 45 p.
11. Tokareva O.S., Kas'yanov I.V. Ocenka dinamiki sostoyaniya rasteniy- bioindikatorov atmosfernogo zagryazneniya na osnove dannykh distancionnogo zondirovaniya // *Vestnik nauki Sibiri*. 2011. No. 1 (1). P. 268–272.
12. Terekhin E.A. Ocenka narushennosti lesnykh ekosistem yugo-zapada Srednerusskoj vozvysheynosti s primeneniem materialov kosmicheskikh s"emok // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2017. Vol. 14, No. 4. P. 112–124.
13. Jadunandan Dash et al. MTCI : The MERIS Terrestrial chlorophyll index // *ENVISAT Symposium Proceedings*. Austria, Salzzburg, 2004.
14. Hall R.J. et al. Modelling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: application to mapping of aboveground biomass and stand volume // *Forest Ecology and Management*. 2006. No. 225. P. 378–390.
15. Krankina O.N., Harmon M.E., Cohen W.B., Oetler D.R., Zyrina O., Duane M.V. Carbon stores, thinks, and sources in forests of northwestern Russia: can we reconcile forest inventories with remote sensing results? // *Climatic change*. 2004. No. 67. P. 257–272.
16. Ponomarev E.I., Shvecov E.G., Litvincev K.Ju. Kalibrovka ocenok pozharnykh jemissij na osnove dannykh distancionnogo zondirovaniya // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2018. No. 5. P. 41–51.
17. Escuin S., Navarro R., Fernandez P. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from Landsat TM/ETM images // *Journal of Remote Sensing*. 2008. No. 29. P. 1053–1073.
18. 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. No. 3. P. 64–90.
19. Terekhin E.A. Geoinformacionnyj analiz narushennosti lesnykh ekosistem s primeneniem raznovremennykh sputnikovyykh dannykh // *Geoinformatika*. 2017. No. 3. P. 56–62.
20. Rozhkov YU.F., Kondakova M.YU. Ocenka narushennosti lesnykh ekosistem posle pozharov s ispol'zovaniem deshifirovaniya kosmicheskikh snimkov // *Fundamental'nye issledovaniya*. 2014. No. 9 (part 9). P. 2018–2022.
21. Rozhkov YU.F., Kondakova M.YU. Ocenka vozmozhnosti ispol'zovaniya pokazatelya simmetrii raspredeleniya pikselej v monitoringe sostoyaniya lesov pri

deshifrirovaniy kosmicheskikh snimkov srednego i vysokogo razresheniya // Nature Conservation Research. Zapovednaya nauka. 2016. No. 1(1). P. 98–107. DOI: 10.24189/ncr.2016.008

22. Rozhkov YU.F., Kondakova M.YU. Ocenka strukturnykh karakteristik lesnykh ekosistem s ispol'zovaniem deshifrirovaniya kosmicheskikh snimkov vysokogo i sverh-vysokogo razreshenij // Vestnik SVFU. 2018. No. 1 (63). P. 38–51. DOI: 10.25587/SVFU.2018.63.10539

23. Rozhkov YU.F., Kondakova M.Yu. Sravnitel'naya harakteristika lesnykh massivov s ispol'zovaniem deshi-

frirovaniya snimkov sverhvyssokogo razresheniya // Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki. 2020. Vol. 25, No 2. P. 125–136. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-10>

24. Isaev A.S., Knyazeva S.V., Puzachenko M.Yu. et al. Ispol'zovanie sputnikovyykh dannykh dlya monitoringa bioraznoobraziya lesov // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2009. No. 2. P. 1–12.

25. Knizhnikov Ju.F., Kravcova V.I., Tutubalina O.V. Ajerokosmicheskie metody geograficheskikh issledovaniy. M.: Akademiya, 2004. 336 p.

About the authors

ROZHKOY Yurii Filippovich, Cand. Sci. (Chemistry), Deputy Director for Scientific Research, Olekminsky State Nature Reserve, 6 Filatova ul., Olekminsk 678100, Russia,

<https://orcid.org/0000-0002-6830-9130>, olekmazap-nauka@yandex.ru;

KONDAKOVA Maria Yuryevna, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Hydrochemical Institute, 1983 Stachki pr., Rostov-on-Don 344090, Russia,

Researcher ID: Z-2288-2019; Scopus ID: 36499623700, vesna-dm@mail.ru.

Citation

Rozhkov Yu.F., Kondakova M.Yu. Evaluation of the disturbance of forest ecosystems and their recovery after wildfire events in the Olekminsky reserve (Russia) using interpretation of Landsat satellite images // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2021, Vol. 26, No. 2. P. 94–107. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-2-6>