

**Э.А. Курбанов** (Поволжский государственный технологический университет)

В 1989 г. окончил Марийский политехнический институт. В настоящее время — профессор кафедры лесоводства ПГТУ, руководитель международного центра «Устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов».

**С.А. Лежнин** (Поволжский государственный технологический университет)

В 2009 г. окончил Марийский государственный технический университет. В настоящее время — ассистент кафедры лесоводства ПГТУ, инженер международного центра «Устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов».

**О.Н. Воробьев** (Поволжский государственный технологический университет)

В 1989 г. окончил Марийский политехнический институт. В настоящее время — доцент кафедры лесоводства ПГТУ, специалист международного центра «Устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов».

**Ю.А. Полевщикова** (Поволжский государственный технологический университет)

В 2012 г. окончила Поволжский государственный технологический университет. В настоящее время — аспирант кафедры лесоводства ПГТУ, специалист международного центра «Устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов».

# Решение вопросов космического мониторинга лесных гарей в комплексных пакетах ENVI и ArcGIS

## ВВЕДЕНИЕ

Экологические, экономические и социальные последствия лесных пожаров 2010 г., затронувшие значительную часть европейской части России, еще долгое время будут находиться в центре внимания общественности. По своему масштабу и воздействию на лесные экосистемы эти события сопоставимы с пожарами 1972 г. Считается, что около трети таких площадей превращаются в непродуктивные территории, на которых в течение нескольких столетий нарушается процесс естественного восстановления лесов [1]. В связи с этим повышаются требования к точности оценок пройденных огнем площадей лесных насаждений, которые в последние годы оперативно отслеживаются с использованием космических снимков [2, 3]. Немаловажным аспектом тематического картирования гарей по данным

дистанционного зондирования также является оценка биомассы лесов и эмиссии углерода в результате пожаров [4, 5, 6].

В связи с нарушением пространственной структуры лесного фонда, неоднородностью рельефа и труднодоступностью отдельных площадей картирование больших территорий гарей традиционными методами представляет собой сложную задачу. В этом случае эффективным решением при дистанционной оценке площадей гарей и степени повреждения растительного покрова после лесного пожара является использование индексов, полученных с разновременных снимков спутника Landsat. Многочисленные работы в этом направлении подтвердили значимость использования индексов, полученных на основе комбинирования видимого красного и ближнего инфракрасного спектральных каналов. Наиболее используемым при таких оцен-

ках является нормализованный разностный индекс растительности NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [7, 8, 9]. Резкие колебания в вегетационном цикле растительности, вызванные засухой и пожарами, часто приводят к аномальным траекториям их роста, что подтверждается мониторингом серии разновременных данных NDVI, полученных на снимках радиометра MODIS [10, 11]. При исследовании последствий пожаров для природных экосистем и выявлении границ гарей также широкое применение находит нормализованный индекс гарей (NBR — Normalized Burn Ratio) [12, 13]. Большинство исследователей отмечается высокая степень корреляции индексов NBR и NDVI с данными полевых тестовых участков на нарушенных пожарами территориях. Известно, что индекс NBR широко используется в практической деятельности лесной службы США для оценки степени повреждения растительных экосистем от лесных пожаров [14].

Степень повреждения лесных экосистем огнем также оценивается исследователями по-разному. В России наиболее используемой является методика оценки последствий пожаров, предложенная проф. Мелеховым (1948) [15] и адаптированная Министерством РФ по делам гражданской обороны,

чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий [16]. Степень повреждения по этой методике оценивается по числу отпавших деревьев и снижению запаса лесного насаждения после пожара.

Цель работы состояла в изучении и оценке индексов NDVI и NBR при мониторинге площадей лесных гарей в Республике Марий Эл 1972 и 2010 гг. по космическим снимкам Landsat в комплексных пакетах ENVI-4.8 и ArcGIS-10.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для изучения границ и степени повреждения древостоев пожарами 2010 г. были проведены полевые работы во время вегетационного периода 2010 и 2011 гг. на территории Килемарского, Юринского, Кокшайского, Куярского, Моркинского и Волжского лесничеств Республики Марий Эл. Оценка гарей по степени повреждения растительности на местности проводилась по следующей шкале: слабая (I степень), умеренная (II–III) и сильная (IV–V) [16].

Эмпирические данные для оценки точности тематического картирования получались путем закладки тестовых полевых участков на исследуемой терри-

Таблица 1

**Характеристика спутниковых снимков Landsat, используемых для создания бесшовной мозаики двух тематических карт 2001 и 2011 гг. на территорию Марий Эл**

Спутник	Покрытие	Время съемки	Облачность
Landsat 7 ETM+	Path 172, Row 21	Август 2011	Отсутствует
	Path 172, Row 20	Июнь 2011	
	Path 171, Row 21		10%
Landsat 5 TM	Path 171, Row 20	Июль 2011	Отсутствует
	Path 174, Row 20	Август 2011	
Landsat 7 ETM+	Path 172, Row 21	Май 2001	
	Path 172, Row 20		
	Path 171, Row 20	Июнь 2001	
	Path 171, Row 21	Август 2001	
	Path 174, Row 20		10%

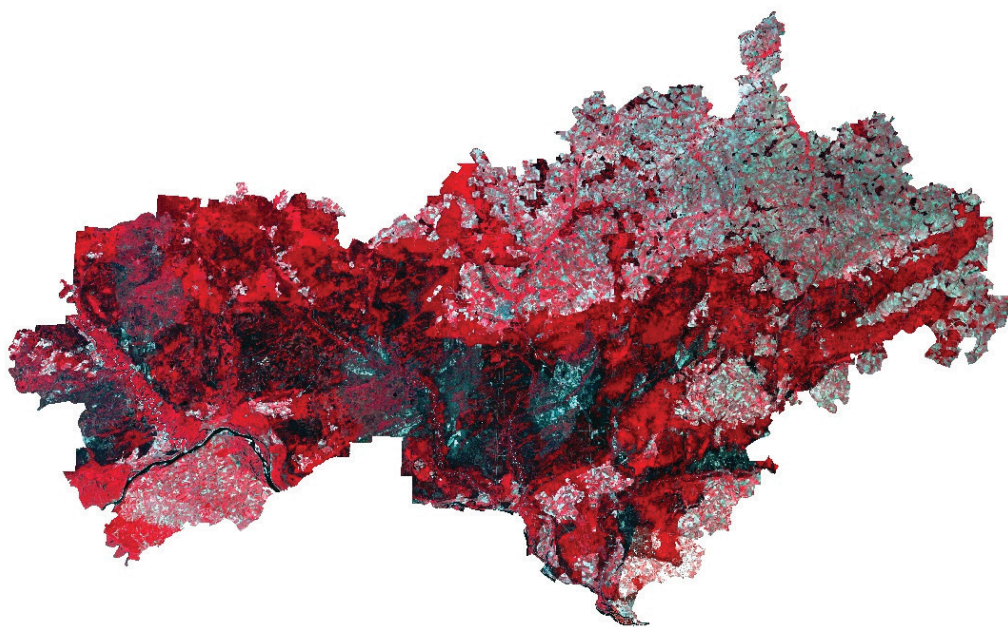


Рис. 1. Мозаика изображений спутника Landsat MSS 1973 и 1975 гг. на территорию Республики Марий Эл

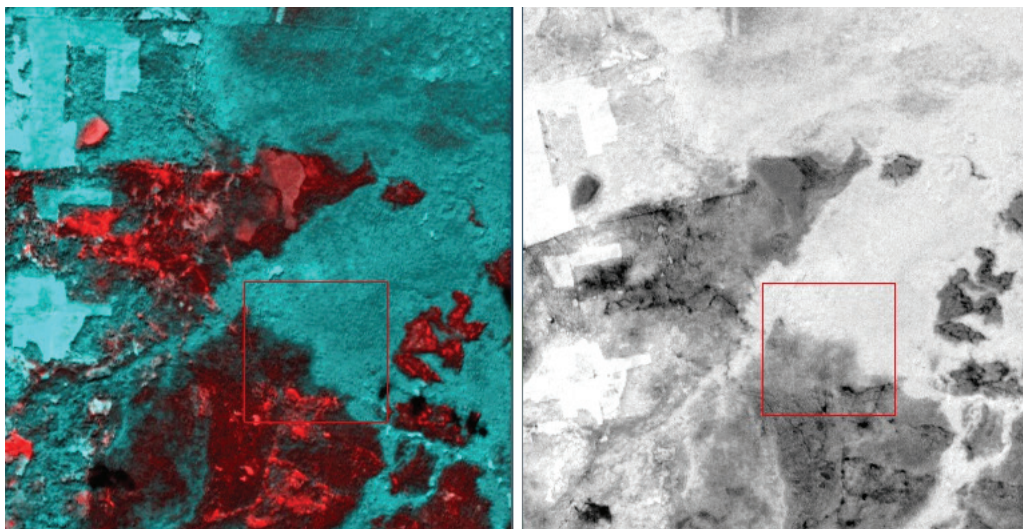


Рис. 2. Участки гарей 1972 г. на территории Юринского лесничества Республики Марий Эл: а) на снимке Landsat MSS в псевдоцветах (синтез красной и инфракрасной зон спектра); б) на карте NDVI, полученной на основе мозаики снимков Landsat MSS 1973–1975 гг.

тории. Кроме того, для этих целей использовались существующие картографические и лесоустроительные материалы. В качестве основного материала для тематического картирования изучаемой местности использовались разновременные мультиспектральные спутниковые снимки Landsat MSS, TM и EMS+ с пространственным разрешением 30 и 60 м, имеющие минимальный облачный покров и атмосферную дымку. Снимки прошли стандартный уровень 1G геометрической и радиометрической калибровки. Для формирования однородных изображений на территорию Республики Марий Эл для всех снимков Landsat также была проведена атмосферная коррекция в модуле FLAASH и линейное спектральное выравнивание изображений в программном комплексе ENVI-4.8. На основе мультиспектральных снимков Landsat (табл. 1), полученных за период с 2001 по 2011 г. (zone 38N, zone 39N\_WGS84), были созданы две бесшовные мозаики на исследуемую территорию за 2001 и 2011 гг.

Бесшовная мозаика спутниковых снимков Landsat MSS 1973 и 1975 гг. на изучаемую территорию была создана для изучения пожаров прошлых лет (рис. 1).

Для этой цели нами был использован индекс NDVI (рис. 2) и архивные лесоустроительные материалы на изучаемую территорию, пороговые значения которого, характеризующие степень нарушенности древостоев лесными пожарами, были приняты как у других авторов [17, 18].

Для оценки лесных гарей в работе использовался нормализованный индекс гарей (*NBR* — Normalized Burn Ratio), который представляет собой разность спектральных отражений в ближнем и коротковолновом инфракрасных каналах, нормализованную на их сумму:

$$NBR = TM4 - TM7 / TM4 + TM7,$$

где *TM4* и *TM7* — спектральные значения двух каналов спутника Landsat в диапазоне (0,75–0,90 мкм) и (2,09–2,35 мкм) соответственно.

Предпосылкой для применения этого индекса при оценках гарей является сопоставление отражений от неповрежденной и пройденной огнем растительности. Ближний инфракрасный 4-й спектральный канал спутникового радиометрического сенсора чувствителен к структуре клеток растительности, в то время как 7-й канал восприимчив к влажности расте-

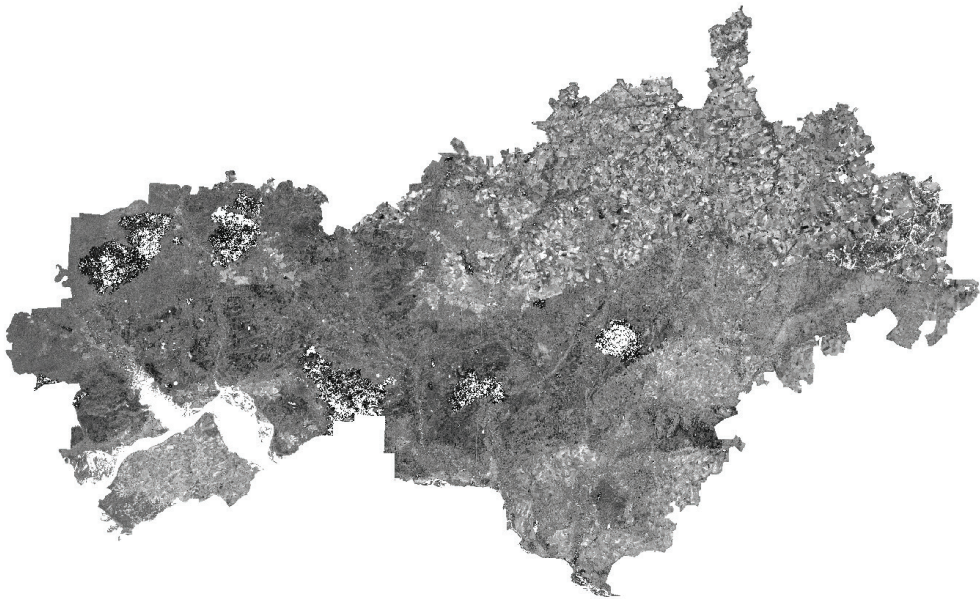


Рис. 3. Тематическое изображение территории Республики Марий Эл, полученное на основе разностного индекса  $\Delta NBR$

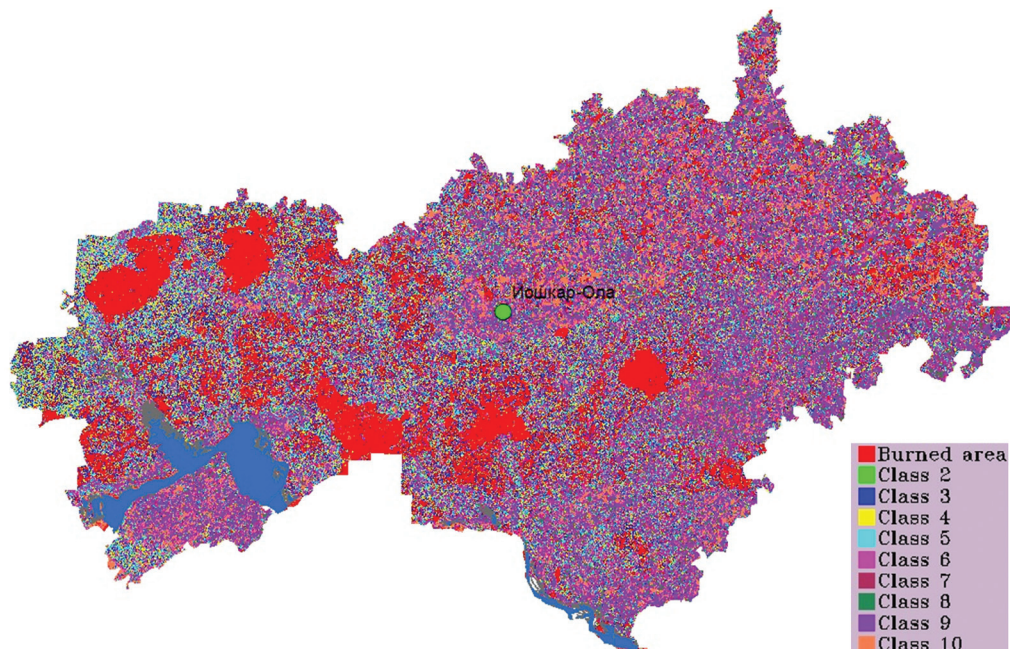


Рис. 4. Тематическая карта территории Республики Марий Эл для 10 классов наземного покрова, полученная методом классификации ISODATA

ний и имеет тенденцию к увеличению на открытых участках и гарях [19, 20]. Разница между этими двумя спектральными каналами показывает хорошие статистические оценки лесных пожаров площадью более чем 200 га [21, 22].

Для определения количественной оценки степени повреждения территории лесными пожарами применялся разностной индекс гарей  $\Delta NBR$ , который вычислялся на основании разности индексов NBR, полученных на снимках Landsat ETM+ 2001 и 2011 гг. (до и после пожаров 2010 г.). Для полученных тематических карт на основе индекса гарей NBR были использованы мозаики 2001 и 2011 гг. мультиспектральных спутниковых снимков Landsat для территории Республики Марий Эл, на основе которых получена базовая тематическая карта разностного индекса гарей  $\Delta NBR$  (рис. 3).

В дальнейшем для этого изображения в пакете ENVI-4.8 была проведена неуправляемая классификация методом ISODATA (Iterative Self-Organizing

Data Analysis Technique), что позволило определить точные контуры и степень повреждения древостоя пожарами. На рис. 4 показана тематическая карта Республики Марий Эл на 10 классов наземного покрова, полученная в результате классификации. На карте хорошо видны крупные очаги гарей 2010 г. (красным цветом).

Из полученного изображения тематической карты наземного покрова в модуле «Mask build» пакета ENVI-4.8 был выделен растровый слой «Гари 2010». Для этого растрового слоя также была применена неуправляемая классификация ISODATA, которая позволила скорректировать площади гарей в Республике Марий Эл. Сложность в определении участков гарей разной степени повреждения на снимках Landsat в связи со смешением пикселей смежных классов снижает точность проведенных работ и повышает неопределенность исследований. В связи с этим на полученном тематическом слое 5 классов гарей по степени повреждения огнем были

объединены в два основных (рис. 5):

- класс 1 — древесной I, II и III степени повреждения;
- класс 2 — древесной IV и V степени повреждения.

Растровый слой гарей первого и второго класса был конвертирован в векторный (shape) формат в программном комплексе ENVI-4.8. Дальнейшая работа по анализу площади гарей была проведена в пакете ArcGis-10.

Валидация вновь полученных тематических карт была выполнена с использованием официальных данных о горимости лесов за пожароопасный период 2010 г., данных полевых исследований гарей коллектива ЦУДМЛ (Центра устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов) и сравнительного анализа снимков Landsat и снимков высокого разрешения RapidEye, приобретенных у компании «Совзонд». Вновь полученные данные по лесным гарям сравнивались с международной базой данных

и пожарной информационной системой для управления природными ресурсами (The Fire Information for Resource Management System, FIRMS), разработанной в Университете штата Мэриленд и поддерживаемой Национальным агентством США по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA). Система позволяет получать оперативную информацию о местоположении пожаров (hotspots) как центров пикселей 1×1 км на основе автоматического регистрирования высокого отражения в тепловых каналах спектра солнечного излучения снимков с камеры MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). В работе для валидации использован слой участков FIRMS возгораний лесного покрова на территорию Республики Марий Эл за период с начала мая по конец сентября 2010 г. (рис. 6).

Пошаговая оценка точности классификации проводилась на основе расчета коэффициентов матрицы различий (Confusion Matrix) и коэффици-

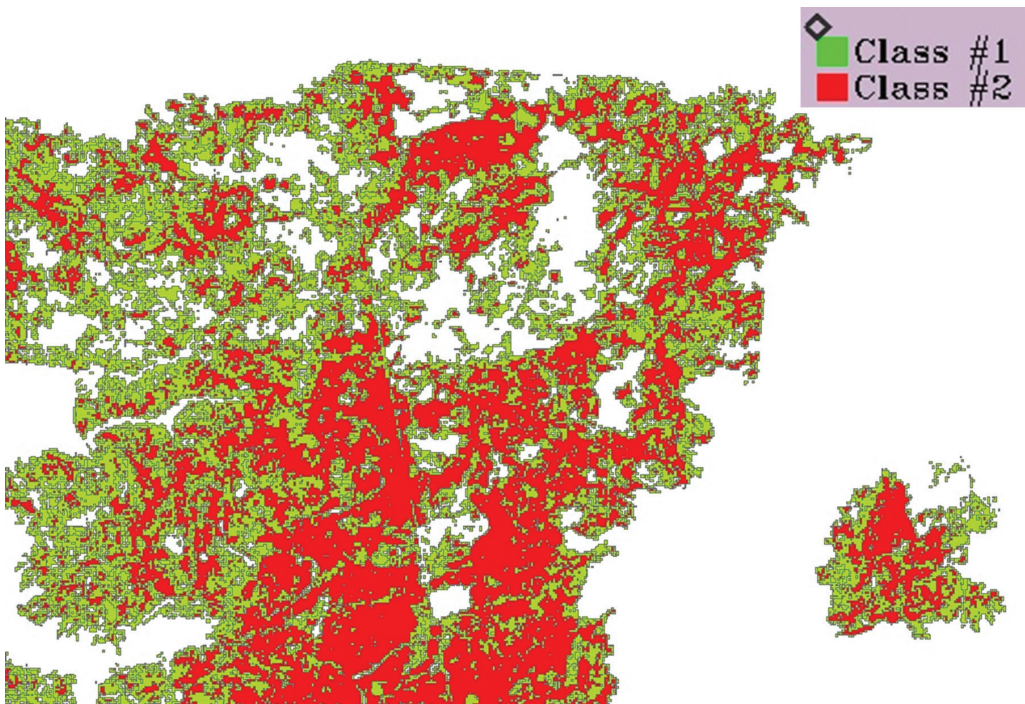
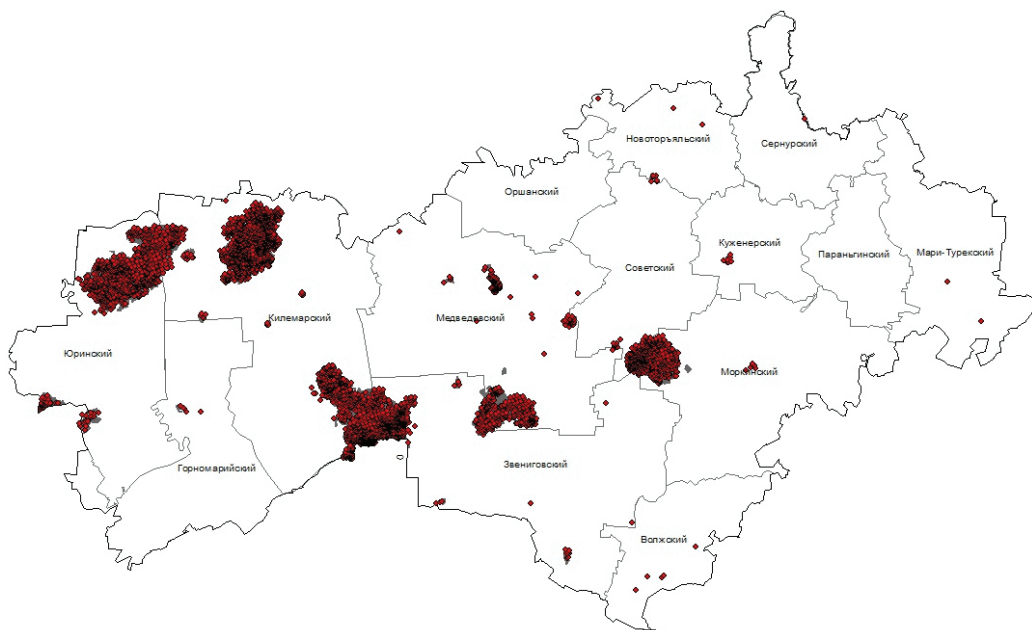


Рис. 5. Фрагмент тематического слоя «Гари 2010» территории Килемарского лесничества Республики Марий Эл с двумя обобщенными классами гарей (белый цвет — ненарушенный лесной покров)



*Рис. 6. Векторный слой участков возгораний (hotspots) по данным FIRMS 2010 г. на территорию Республики Марий Эл*

ента Каппа (Kappa Index) [23], которые наиболее часто используются в современной научной литературе.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

После проведения всех работ в комплексных пакетах ENVI-4.8 и ArcGis-10 была получена тематическая карта распределения лесных гарей 1972 и 2010 гг. и рассчитаны их площади для территории Республики Марий Эл (рис. 7, 8).

По нашим оценкам, общая площадь лесных гарей 1972 г. составила 212,3 тыс. га, что на 12% выше официальных данных (180 тыс. га) [24].

В 2010 г. площадь гарей по данным, полученным на основе снимков Landsat, составила 100,2 тыс. га, что на 28% выше данных (72,8 тыс. га) министерства лесного хозяйства Республики Марий Эл [25]. При этом по степени повреждения лесных насаждений пожарами эти площади распределялись следующим образом: I класс — 57,4 тыс. га и II класс — 42,8 тыс. га. Площади, повторно прой-

денные огнем в 2010 г., составили 34 228,1 га.

Точность проведенной оценки площадей лесных гарей за 1972 и 2010 гг. и полученных тематических карт подтверждается высоким значением коэффициента Каппа (0,9).

Кроме того, как видно из рис. 9, распределение точек распространения огня (темные пятна, hotspots) практически полностью совпадает с вновь полученными контурами гарей за 2010 г.

Анализ распределения гарей по исследуемой территории Республики Марий Эл показал, что основная часть площади лесных пожаров за 1972 и 2010 гг. пришлась на хвойные насаждения республики. Аналогичная ситуация повторилась в пожароопасный сезон 2010 г.

Как видно из рис. 10, в 2010 г. повторно (после пожаров 1972 г.) выгорели сосновые насаждения в центральной и северо-западной части Республики Марий Эл. В 2010 г. в значительной степени также пострадали сосновые лесные культуры, созданные в республике после пожаров 1972 г.

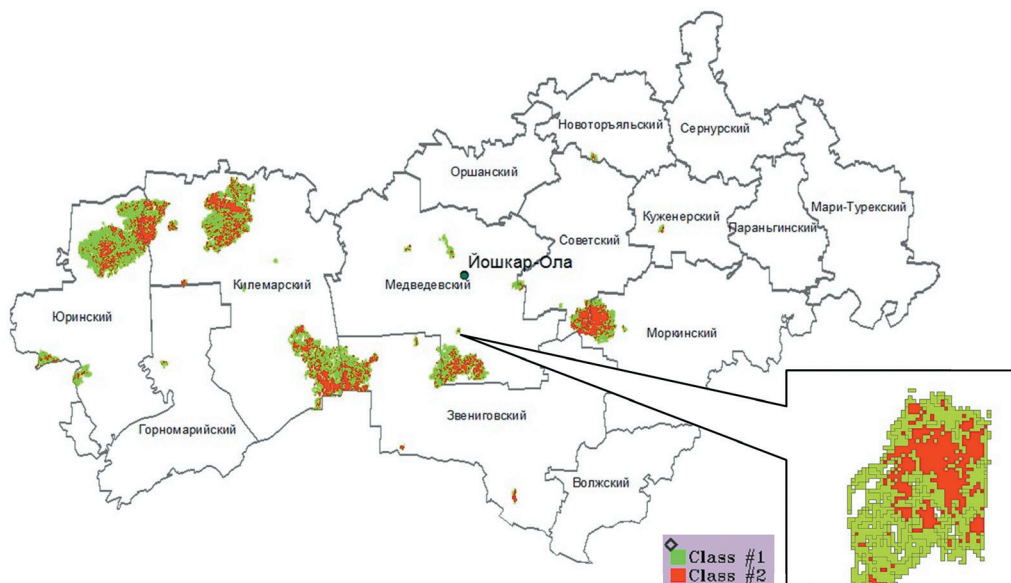


Рис. 7. Распределение основных площадей лесных пожаров в Республике Марий Эл по двум классам в зависимости от степени повреждения

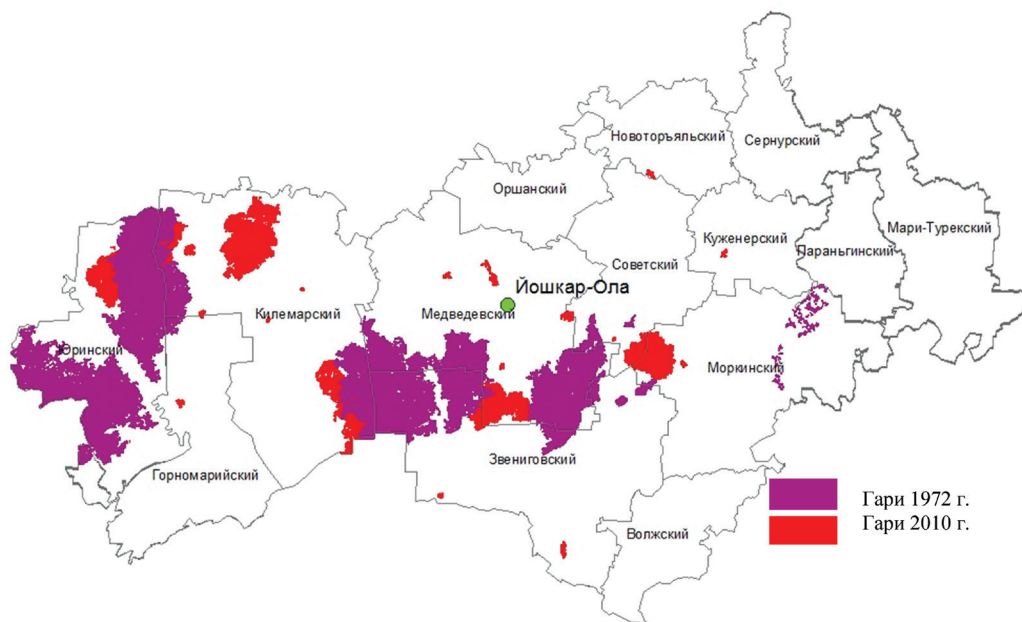
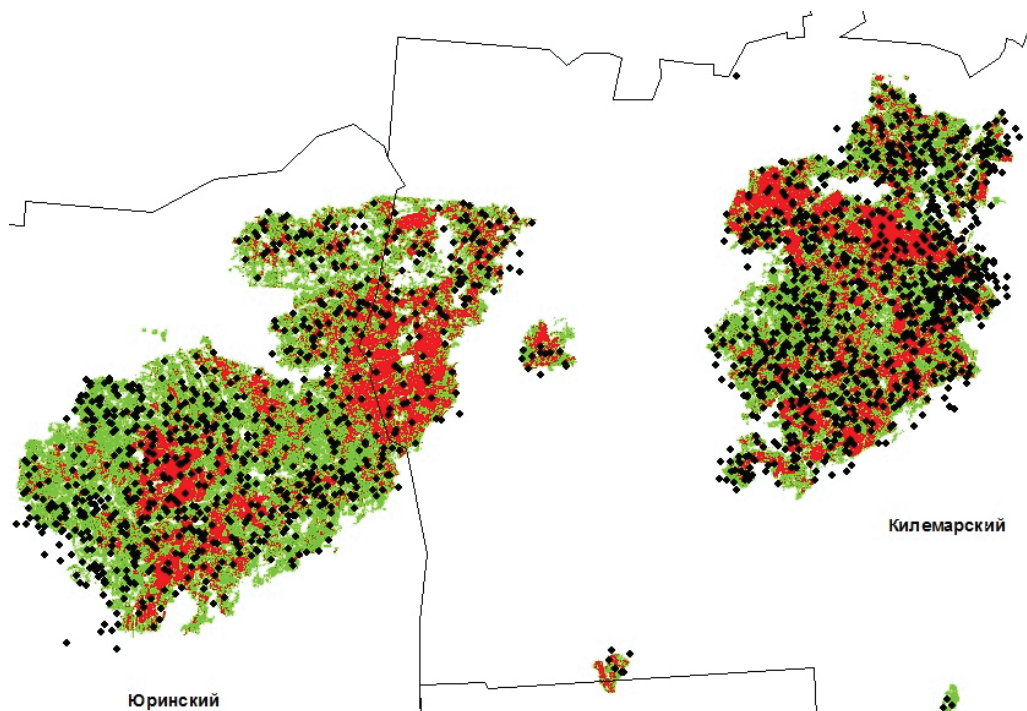


Рис. 8. Площади лесных пожаров 1972 и 2010 гг. на территории Республики Марий Эл





*Рис. 9. Распределение hotspots (точки распространения огня — темным цветом) на территории лесных гарей Килемарского лесничества Республики Марий Эл. Белый фон на рисунке представляет собой неповрежденные огнем участки лесного фонда*

## ВЫВОДЫ

Оценка точности полученных данных площадей гарей на основе полевых исследований и независимых источников свидетельствует о высокой их достоверности и верности выбора примененных индексов. Тематическое картирование, генерализация и векторизация полигонов гарей за 1972 и 2010 гг. на спутниковых снимках проводились автоматически в ГИС-среде на основе нормализованного вегетационного индекса NDVI и разностного индекса гарей  $\Delta NBR$ , что позволило исключить субъективность при оценке полученных результатов. Исследования показали высокую важность данных спектрорадиометра среднего разрешения Landsat и современных программных геоинформационных комплексов ENVI-4.8 и ArcGIS-10 для проведения

дистанционного мониторинга нарушенности земель лесного фонда пожарами.

Общая площадь лесных гарей на территории Марий Эл по данным исследований составила 212,3 тыс. га в 1972 г. и 100,2 тыс. га в 2010 г. Совмещение тематических карт гарей 1972 и 2010 гг. показало, что лесные пожары 2010 г. в значительной степени затронули те же лесные территории Республики Марий Эл, которые пострадали от пожаров в 1972 г.

*Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы соглашение № 14.В37.21.1245 Министерства образования и науки Российской Федерации «Дистанционный мониторинг и прогнозирование состояния лесных насаждений по спутниковым снимкам» и тематического плана Министерства образования и науки РФ.*

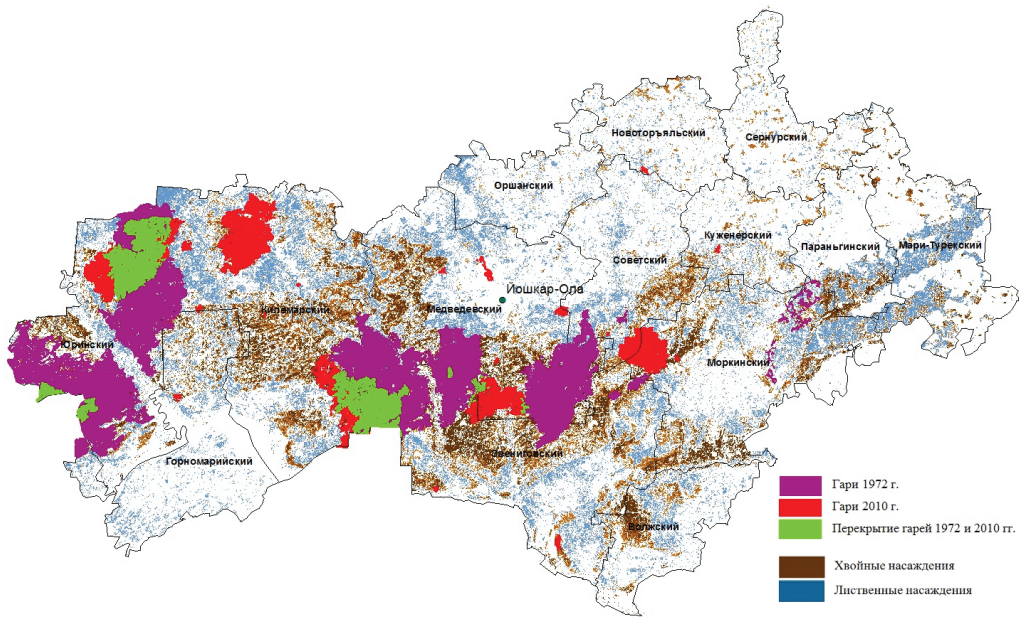


Рис. 10. Распределение пожаров 1972 и 2010 гг. на тематической карте по двум основным классам растительного покрова Республики Марий Эл

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Швиденко А.З. Влияние природных пожаров в России 1998-2010 гг. на экосистемы и глобальный углеродный бюджет / А.З. Швиденко, Д.Г. Щепаченко, Е.А. Ваганов, А.И. Сухинин, Ш.Ш. Максутов, И. МакКаллум, И.П. Лакида // География. – 2011. – № 4(441). – С. 544–548.
2. Курбанов Э.А. Дистанционный мониторинг динамики нарушений лесного покрова, лесовозобновления и лесовосстановления в Марийском Заволжье / Э.А. Курбанов, Т.В. Нуреева, О.Н. Воробьев, А.В. Губаев, С.А. Лежнин, Т.Ф. Мифтахов, С.А. Незамаев, Ю.А. Попевщикова // Вестник МарГТУ. – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет. – 2011. – № 3. – С. 17–24.
3. Бартаев С.А. Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+ / С.А. Бартаев, В.А. Егоров, В.Ю. Ефремов, Е.А. Лупян, Ф.В. Стыценко, Е.В. Флитман // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – № 2. – Т. 9. – С. 343–351.
4. Hall R.J. Modelling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: application to mapping of aboveground biomass and stand volume / R.J. Hall, R.S. Skakun, E.J. Arsenault, B.S. Case // Forest Ecology and Management. – 2006. – № 225. – P. 378–390.
5. Krankina O.N. Carbon stores, sinks, and sources in forests of northwestern Russia: can we reconcile forest inventories with remote sensing results? / O.N. Krankina, M.E. Harmon, W.B. Cohen, D.R. Oetter, O.Zyrina, M.V.Duane // Climatic change. – 2004. – № 67. – P. 257–272.
6. Курбанов Э.А. Оценка зарастания земель запаса Республики Марий Эл лесной растительностью по спутниковым снимкам / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, А.В. Губаев, С.А. Лежнин, С.А. Незамаев, Т.А. Александрова // Вестник МарГТУ. – Йошкар-Ола: МарГТУ. – 2010. – № 2(9). – С. 14–20.
7. Escuin, S. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference

- Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images/ S. Escuin, R. Navarro, P. Fernandez // *International Journal of Remote Sensing*. – 2008. – № 29.– pp. 1053–1073.
8. Hudak, A.T. The relationship of multispectral satellite imagery to immediate fire effects/ A.T. Hudak, P. Morgan, B.M.J Smith, S.A. Lewis, L.B. Lentile, P.R. Robichaud, J.T. Clark, R.A. McKinley // *Journal of Fire Ecology*. – 2007. – № 3.– pp. 64–90.
  9. Jose, R.R.L. Using MODIS-NDVI for the Modeling of Post-Wildfire Vegetation Response as a Function of Environmental Conditions and Pre-Fire Restoration Treatments / R.R.L. Jose, W.J.D. van Leeuwen, G.M. Casady// *Remote sensing*. – 2012. – № 4.– pp. 598–621.
  10. van Leeuwen, W.J.D. Monitoring the effects of forest restoration treatments on post-fire vegetation recovery with MODIS multitemporal data/ W.J.D. van Leeuwen // *Sensors*. – 2008. – № 8.– pp. 2017–2042.
  11. Chuvieco, E. Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination / E. Chuvieco, M.P. Martin, A. Palacios // *International Journal of Remote Sensing*. – 2002. – № 23.– pp. 5103–5110.
  12. Key, C.H. Remote Sensing Measure of Severity: The Normalized Burn Ratio / C.H. Key, N.C. Benson // *FIREMON Landscape Assessment (LA) V4 Sampling and Analysis Methods*. – 2004. – pp. LA1-16.
  13. Howard, S.M. An evaluation of Gap-Filled Landsat SLC-Off imagery for wildland fire burn severity mapping / S.M. Howard, M.L. Lacasse // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. – 2004. – № 70. – pp. 877–879.
  14. Rollins, M.G. LANDFIRE: a nationally consistent vegetation, wildland fire, and fuel assessment/ M.G. Rollins// *International Journal of Wildland Fire*. – 2009. – № 18.– pp. 235–249.
  15. Мелехов И.С. Влияние пожаров на лес / И.С. Мелехов Т.—М.—Л.: Гослестехиздат, 1948. – 126 с.
  16. Методика оценки последствий лесных пожаров. Сборник методик по прогнозированию возможных аварий, катастроф, стихийных бедствий в РСЧС (Книга 2). – М.: МЧС России, 1994 г. –11 с.
  17. Martin, M.P. Mapping and evaluation of burned land from multitemporal analysis of AVHRR NDVI images / M.P. Martin, E. Chuvieco // *Advanced in Remote Sensing*. – 1995. – № 3(4). – pp. 7–13.
  18. Leon, J.R.R. Using MODIS-NDVI for the modeling of post-wildfire vegetation response as a function of environmental conditions and pre-fire restoration treatments / J.R.R. Leon, J.D.V.L Willem, G.M. Casady // *Remote Sensing*. – 2012. – № 4. – pp. 598–621.
  19. Key, C.H. Ecological and sampling constraints on defining landscape fire severity / C.H. Key // *Fire Ecology*. – 2006. – № 2. – pp. 34-59.
  20. Cansler, C.A. How Robust Are Burn Severity Indices When Applied in a New Region? Evaluation of Alternate Field-Based and Remote-Sensing Methods /C.A. Cansler, D. McKenzie // *Remote sensing*. – 2012. – № 4. – pp. 465–483.
  21. Cocke, A.E. Comparison of burn severity assessments using differenced normalized burn ratio and ground data/ A.E. Cocke, P.Z. Fule, J.E. Crouse// *International Journal of Wildland Fire*. – 2005. – № 14. –189–98 с.
  22. Loboda, T. Regionally adaptable dNBR-based algorithm for burned area mapping from MODIS data / T. Loboda, K.J. O'Neal, I. Csizsar// *Remote Sensing of the Environment*. – 2007. – № 109(4).– pp. 429–442.
  23. Губаев А.В. Классификация наземного покрова Среднего Поволжья по спутниковым снимкам среднего разрешения / А. В. Губаев, Э. А. Курбанов, О. Н. Воробьев, С. А. Лежнин, Ю.А. Полевщикова // *Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: материалы международного научно-практического семинара [Электронный ресурс]. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2011. – С. 7–19. URL: <http://csfm.marstu.net/publications.html>*
  24. Проблемы ликвидации последствий лесных пожаров 1972 г. в Марийской АССР. сборник докладов и выступлений на выездном заседании секции лесного хозяйства и лесной промышленности научно-технического совета МВ и ССО СССР, проходившем в Йошкар-Оле с 16 по 21 сентября 1974 г. — Йошкар-Ола. Марийское книжное издательство, – 1976. – 143 с.
  25. Республиканская целевая программа «Лесовосстановление гарей 2010 года на 2011-2016 годы». Утверждена постановлением Правительства Республики Марий Эл от 18 марта 2011 г. № 80. – 11 с.