

УДК 528.9

ПРИМЕНИМОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИНДЕКСОВ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ОЦЕНКИ ПЛОЩАДИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Чернышева М. А.¹, Шигапов И. С.², Мингалиев Р. Р.³

*^{1,2,3} Казанский федеральный университет, Казань, Российская Федерация
E-mail: ¹marya.chernysheva99@mail.ru, ²shigapov.irshat@yandex.ru, ³remez-z@mail.ru*

В статье рассматривается дистанционная оценка площади лесопокрытых территорий, пройденных пожарами, по материалам разновременных спутниковых съемок с космических аппаратов Landsat TM/MSS. Методика детектирования гарей (выгоревших территорий) основана на расчете спектральных индексов для предпожарного и послепожарного периодов. Произведено сравнение количественных показателей результатов отделения гарей от негоревших участков по специализированным вегетационным индексам: dNBR, dNDVI, dPSRI, dEVI, dBAI, dMIRBI. Проведена оценка погрешности измерения площади наблюдаемых пожаров. Показано что для большинства случаев лесных пожаров, оцениваемых по спутниковым данным высокого разрешения, (по индексам NBR, MIRBI) относительная погрешность получаемых результатов составляет порядка 10%. В случае, когда интегральная площадь пожара превышает 100 км² ошибка снижается до менее 5%.

Ключевые слова: спутниковые снимки, гари, спектральные индексы, Landsat, ГИС-технологии, лесные пожары, ДДЗ.

ВВЕДЕНИЕ

На территории России ежегодно регистрируется от 10 до 30 тысяч лесных пожаров, нередко принимающих характер стихийных бедствий. С возрастанием масштабов лесных пожаров стало усиливаться внимание исследователей к данной проблеме. В частности, происходит расширение и совершенствование технологий и методик изучения, мониторинга и оценки последствий от лесных пожаров. Кроме традиционных наземных исследований, все чаще привлекаются современные технологии. Как правило оценка последствий природных катастроф, выполняется выборочно, методами наземного лесопатологического обследования, что сопряжено с существенными финансовыми и трудовыми затратами, а их регулярное применение в масштабах страны едва ли экономически оправдано и практически реализуемо. Применение же космических снимков существенно облегчает решение этой задачи благодаря пространственному охвату и регулярности съемки [1].

Возможность применения данных дистанционного зондирования (ДДЗ) при картографировании и идентификации типов растительности, а также их стрессового состояния обусловлена спектральной отражательной способностью растительности, характеризующейся различиями в отражении излучения разных длин волн.

Для выявления и оценки площади территорий, пройденных огнем, активно используется создание индексных изображений, являющихся результатом работы со спектральной информацией. Изображения строятся на основе алгебраических преобразований яркостей и комбинации коэффициентов отражения каналов многоканальных спутниковых снимков. Значение рассчитанного индекса в каждом пикселе получаемого изображения позволяет выделить исследуемый объект и/или оценить его состояние [2, 3].

ПРИМЕНИМОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИНДЕКСОВ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ОЦЕНКИ ПЛОЩАДИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Современной науке известно более 150 вариаций спектральных индексов. Каждый индекс получен эмпирическим путем, полагаясь на известные тенденции спектральной отражательной способности воды, почв, растительности и других типов объектов. Среди известных индексов можно выделить отдельный класс так называемых вегетационных индексов, которые применяются для исследований изменения растительного покрова. Некоторые из этих индексов можно применять для выделения пострадавших от пожаров территорий. В частности, возможен учет содержания хлорофилла, площади листовой поверхности, сомкнутости и структуры растительного покрова, а также показатели, отражающие процесс «старения» и отмирания растений. Также важно учитывать оценку содержания влаги в растительном покрове [4, 5].

Цель исследования заключалась в определении спектрального индекса, являющегося наиболее эффективным при оценке территорий, пострадавших от лесных пожаров. Для этого была проведена оценка количественных характеристик лесных пожаров по различным спектральным индексам, выполнено сравнение и определение относительной погрешности полученных результатов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения исследования была выбрана территория республики Марий-Эл (РМЭ). Общая площадь республики составляет 2337,5 тыс. га, из них 1276,9 тыс. га занято лесами (лесистость — 54,6 %). За исследуемый период определен 2010 г., в котором, как и в многих регионах России, территория РМЭ была подвержена большому количеству случаев возникновения лесных пожаров.

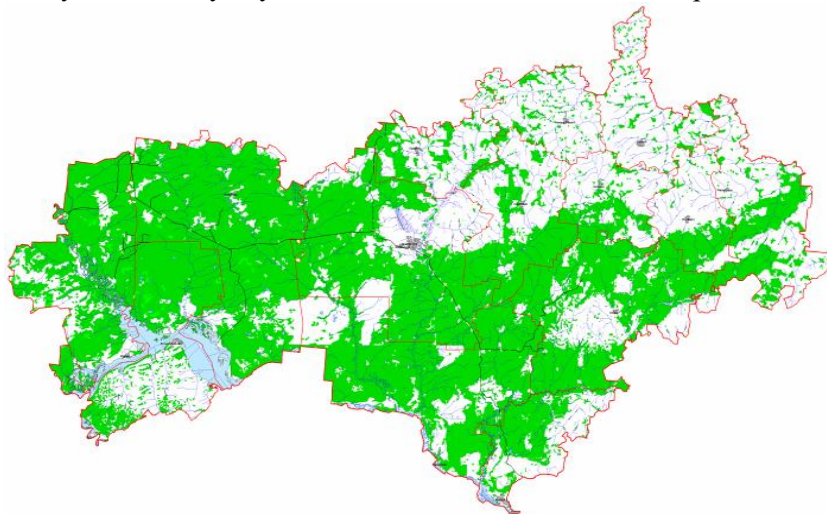


Рис. 1. Территория Республики Марий-Эл.

Для выявления и оценки количественных и площадных характеристик используются специализированные «индексные» изображения, полученные вычислением индексов NBR, NDVI, PSRI, EVI, BAI, MIRBI (таблица 1). Получение

таких изображений предполагает работу со спектральной информацией ДДЗ. Проведя анализ обеспеченности ДДЗ территории республики Марий-Эл за исследуемый период, нами были отобраны архивные мультиспектральные спутниковые снимки с космических аппаратов Landsat 5 TM.

Таблица 1.

Используемые спектральные индексы

Аббревиатура спектрального индекса	Расчетная формула	Формула для спутника Landsat 5
NBR (Normalized Burn Ratio)	$\frac{NIR - SWIR_2}{NIR + SWIR_2}$	$\frac{b4 - b7}{b4 + b7}$
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$\frac{NIR - RED}{NIR + RED}$	$\frac{b4 - b3}{b4 + b3}$
EVI (Enhanced Vegetation Index)	$2 \frac{NIR - RED}{NIR + 6RED - 7.5BLUE + 1}$	$2 \frac{b4 - b3}{b4 + 6b3 - 7.5b1 + 1}$
PSRI (Plant Senescence Reflectance Index)	$\frac{RED - GREEN}{NIR}$	$\frac{b3 - b2}{b4}$
BAI (Burned Area Index)	$\frac{1}{(0,1 - RED)^2 + (0,06 - NIR)}$	$\frac{1}{(0,1 - b3)^2 - (0,06 - b4)}$
MIRBI (Mid-Infrared Burned Index)	$10SWIR_2 - 9.8SWIR_1 + 2$	$10b7 - 9,8b5 + 2$

где NIR — отражение в ближней инфракрасной области спектра; SWIR₁ — отражение в ближней инфракрасной области спектра (1,55–1,75 мкм); SWIR₂ — отражение в средней инфракрасной области спектра (2,09–2,35 мкм); RED — отражение в красной области спектра; GREEN — отражение в зеленой области спектра; bi — i канал спутника Landsat TM/MSS.

Составлено автором.

ПРИМЕНИМОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИНДЕКСОВ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ОЦЕНКИ ПЛОЩАДИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Для исследования отбирался ряд снимков, охватывающих только пожароопасный сезон (май-сентябрь) двух периодов: 2009 г (prefire) и 2011 г (postfire) из интернет-архива USGS. Исходные данные поставляются в формате geoTIFF, с уровнем обработки L1T.

Предварительная обработка спутниковых снимков и расчет спектральных индексов проводилась в программном комплексе QGIS.

На используемых снимках присутствует облачность и территории, занятые водными объектами, что дает ошибку в определении территорий гарей по “индексным” изображениям. Следовательно, для точности идентификации территорий гарей из результата выявленных изменений (разности индекса) следует вычистить территории, занятые водными объектами и облачностью. Для этого прибегают к созданию маски облачности и водной маски.

Для создания водной маски использовался стандартный водный индекс (Water Ratio Index). Значения индекса WRI равный 1 или более означает, что данный пиксель занят водным объектом.

Для создания маски облачности выбран метод, заключающийся в подборе порога значений по голубому спектральному диапазону (1 канал Landsat TM). Эмпирическим путем был подобран порог для облачности от 0,02 до 0,4.

Для выявления произошедших изменений и получения площадных характеристик была вычислена разность каждого индекса dI по формуле:

$$dI = I_{\text{prefire}} - I_{\text{postfire}} \quad (1),$$

где I — какой-либо спектральный индекс; I_{prefire} — значения этого индекса до пожара; I_{postfire} — значения этого индекса после пожара.

Методика идентификации территорий гарей, основанная на использовании материалов космической съемки, включает проведение ряда последовательных этапов от отбора подходящих спутниковых снимков до векторизации маски гарей (рис. 2.).

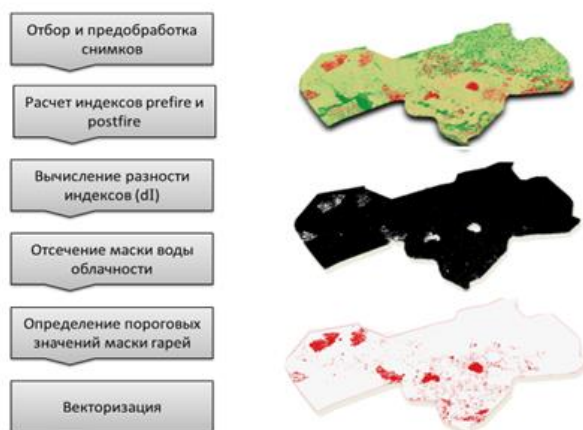


Рис. 2. Этапы идентификации гарей.

Составлено автором.

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ГАРЕЙ ПО СПУТНИКОВЫМ СНИМКАМ

В результате для оценки лесопокрытых территорий, поврежденных пожарами отобран ряд специализированных спектральных индексов (табл. 1).

Для оценки степени повреждения растительности от пожаров создается индексное изображение NBR (нормализованный коэффициент горения) [6]. Расчет основывается на тенденции чувствительности к структуре клеток ближнего инфракрасного диапазона и на чувствительности к влажности растительности коротковолнового инфракрасного диапазона.

Оценка территорий с утраченной растительностью проводится по индексному изображению NDVI (нормализованный разностный вегетационный индекс). Данный индекс основывается на данных отражения и поглощения растениями лучей красного и ближнего инфракрасного спектра. Так как данный индекс обладает наибольшей чувствительностью к изменениям в растительности, по его значению в каждом пикселе можно трактовать показатели общего количества фотосинтетической биомассы и ее состояния.

Анализ массы растительности проводится по индексному изображению EVI (улучшенный вегетационный индекс). По специфике применения данный индекс аналогичен предыдущему, но обладает большими преимуществами при небольшом проценте покрытия растительности на снимке, поскольку влияние атмосферы и почвы в данном индексе сводится к нулю.

Для оценки сухих и отмерших растений используется индексное изображение PSRI (индекс «старения» (наличия «сухого» углерода)). Для расчета содержания «сухого» углерода в виде лигнина и целлюлозы используются узкие спектральные диапазоны, позволяющие судить о поглощении азота и синтезе основных органических веществ в растениях.

Выявление территорий подверженных огню проводится по индексным изображениям BAI (индекс гари) и MIRBI (индекс выгорания в среднем инфракрасном диапазоне) [7]. При разграничении несгоревших и горевших участков по индексу гари используют знания о чувствительности растительности на отражательные и поглощающие способности красного и ближнего инфракрасного диапазонов спектра. Индекс MIRBI основан на применение такой комбинации инфракрасного канала, при котором появляется возможность сильного спектрального разделения областей на горевшие и не горевшие территории.

На рисунке 3 представлена сравнение масок гарей, полученных путем векторизации различных индексных изображений. На рисунке показаны границы пострадавшей территории от лесных пожаров в 2010 г (по данным наземных исследований), площадь данного пожара составляет 10025 га. Красным цветом отображаются выгоревшие территории по данным расчета спектрального индекса. Как видно на рисунке, наиболее точно отражает территорию пожара маски, рассчитанные по индексам dMIRBI и dNBR, а также dBAI, наименее показателен индекс dPSRI.

**ПРИМЕНИМОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИНДЕКСОВ
ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ОЦЕНКИ ПЛОЩАДИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ**

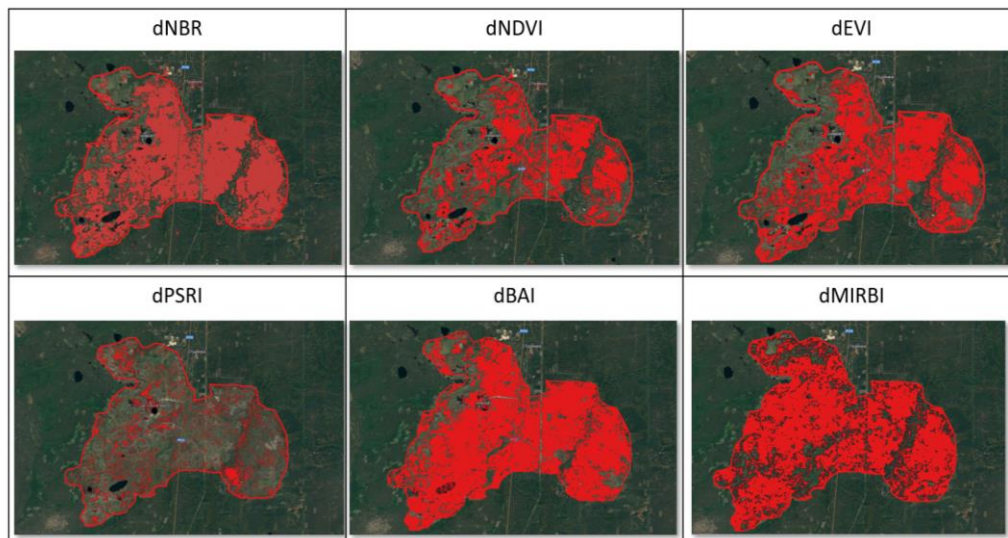


Рис. 3. Маска гарей по разным спектральным индексам.
Составлено автором.

СРАВНЕНИЕ И ОЦЕНКА СПЕКТРАЛЬНЫХ ИНДЕКСОВ

По маскам гарей каждого индекса рассчитаны площади выгоревших территорий по каждому району и по всей республике в целом. Оценку точности получаемых площадных показателей выгоревших участков по разным вегетационным индексам можно провести в случае, если мы обладаем информацией о точных площадях исследуемых гарей. Для проведения такой оценки был сформирован набор сравнительных данных о площадях территорий, пострадавших от лесных пожаров. Полученные результаты площадей, пострадавших от лесных пожаров представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Сравнение площадей гарей по разным спектральным индексам

Район	Площадь выгоревших территорий (га)						
	Официальные данные	dNBR	dNDVI	dEVI	dPSRI	dBAI	dMIRBI
1	2	3	4	5	6	7	8
Волжский	58,9	92,7	55,5	72,6	24,5	85,2	74,6
Мари-Турекский	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Оршанский	5,4	45,0	26,9	35,2	11,9	49,5	52,6

Продолжение таблицы 2.

1	2	3	4	5	6	7	8
Параньгинский	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0
Сернурский	5,7	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	0,0
Советский	61,7	45,2	27,1	35,4	11,9	49,7	52,8
Горномарийский	427,3	397,2	189,9	248,3	83,7	348,6	407,3
Куженерский	175,8	125,8	44,5	58,2	19,6	101,6	80,6
Новоторьялский	143,4	92,2	37,2	48,7	16,4	103,4	121,9
Звениговский	11509,0	12088,4	7236,8	9463,6	3191,5	13283,9	11609,3
Килемарский	30064,7	30001,7	17960,6	23487,3	7920,9	32968,8	30569,3
Медведевский	13118,2	12867,5	7703,2	10073,5	3397,2	14140,1	13041,8
Моркинский	8975,0	8569,4	5130,1	6708,7	2262,4	9416,9	9975,4
Юрьинский	15559,7	14128,2	8457,9	11060,5	3730,1	15525,5	16514,6
Всего по РМЭ	80107,8	78453,3	46869,7	33449,2	11280,5	46993,0	42968,4

Составлено автором.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что официальные данные показывают большее число поврежденных территорий в отличии от данных полученных методом расчета вегетационных индексов. Это можно объяснить влиянием на качество оценки случайных и некоторых систематических погрешностей, вносимых погодными условиями, облачностью и дымкой. Снизить влияние случайных погрешностей на результат можно путем корректировки используемых коэффициентов в индексе, а также расчетом и усреднением серийных композитных изображений за несколько дней, недель или месяцев.

Также площадь гарей может быть занижена вследствие того, что в некоторых местах (пикселях) композиты могли быть перекрыты облаками и удалены с маской облачности. Для снижения погрешности от данного фактора стоит применять снимки с более короткими интервалами съемки, для расширения выбора снимков в безоблачные дни, но обычно снимки с частой периодичностью съемки обладают низким пространственным разрешением

Отсутствие выявленных пожаров в ряде районов (Мари-Турекский, Параньгинский, Сернурский) можно объяснить тем, что не все типы пожаров можно зафиксировать, используя снимки Landsat. В данном случае это малые низовые пожары, которые, как правило, плохо выделяются на снимках.

Также стоит отметить, что неоцененность выгоревших площадей также

ПРИМЕНИМОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИНДЕКСОВ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ОЦЕНКИ ПЛОЩАДИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

напрямую зависит от разрешения пикселя, для используемых снимков пространственное разрешение равно 30 м, что повысило погрешность результатов.

Для оценки эффективности применения того или иного спектрального индекса использовалась формула:

$$\delta = \frac{X - \Delta X}{\Delta X} * 100\% \quad (2)$$

где X — истинное (точное) значение; ΔX — приближенное значение.

За условно истинное значение приняты данные площадей пожаров по официальной статистике, опубликованные в государственном докладе об экологической ситуации в Республике Марий Эл в 2010 году. За приближенное значение приняты значения общей площади пожаров в республике, полученные по разным спектральным индексам.

Относительная погрешность каждого спектрального индекса рассчитывалась по каждому району и по всей республике, значения, полученные по районам, усреднялись. Полученные данные рассчитанной относительной погрешности оценки территорий лесных пожаров на территории РМЭ по разным спектральным индексам представлены на рисунке 4.

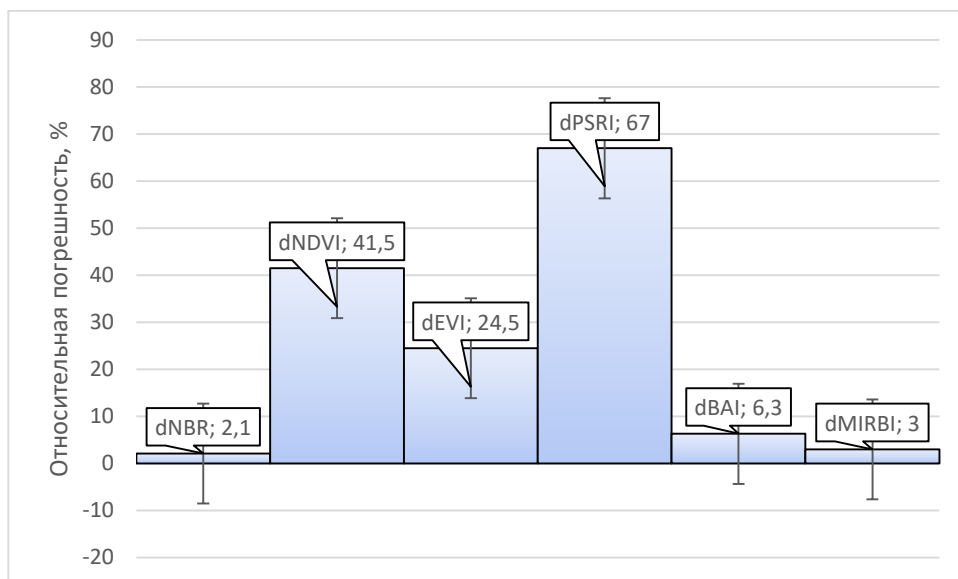


Рис. 4. Относительная погрешность разных спектральных индексов.

Составлено автором.

Таким образом, выявлено, что значение относительной погрешности выявления гарей по спутниковым данным ТМ сильно зависит от площади поврежденных территорий. Для районов, где лесным пожарам была подвержена площадь менее 100 га, относительная погрешность оценки по всем изучаемым спектральным индексам составила более 50%, при этом абсолютная погрешность может составлять менее 5

га. Отсюда можно сделать вывод, что дешифрирование по космическим снимкам относительно малых площадей повреждений в масштабах региона не эффективно. В данном случае оценку стоит проводить по снимкам с большим разрешением и в масштабе отдельных конкретных пожаров, сопоставляя с другими данными, прежде всего наземной оценки. Относительная погрешность расчетов площади в целом по республике и усреднённые значения для районов с повреждённой площадью более 1000 га были идентичны.

Выполненная оценка относительной погрешности свидетельствует о том, что высокой достоверностью выявления поврежденных лесными пожарами территорий обладают MIRBI и NBR (погрешность менее 5%), также к индексам с погрешностью менее 10% относится BAI. Наименьшую эффективность даёт индекс PSRI.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в работе результаты экспериментальных исследований показывают, что ряд спектральных вегетационных индексов дает возможность провести дистанционную оценку площади территорий, поврежденных лесными пожарами. Рассматриваемые спектральные вегетационные индексы основывались на использовании одномоментных одновременных данных, отражающих состояние лесной растительности до воздействия огня и после. Установлено, что при оценке повреждённой пожарами лесной растительности наибольшей информативностью обладают спутниковые измерения в красном и инфракрасном диапазонах.

Сравнительный анализ показал, что на сегодняшний день разностный нормализованный коэффициент горения (dNBR) и разностный индекс выгорания в среднем инфракрасном диапазоне (dMIRBI) являются наиболее эффективными для анализа и количественной оценки лесных пожаров. При этом в большинстве случаев при оценке площадей лесных пожаров (по индексам NBR, MIRBI) относительная погрешность получаемых результатов составляет менее 10%. Следовательно, снимки Landsat несмотря на малую периодичность съёмки могут применяться для оценки лесных пожаров в масштабе региона. Однако повышение точности количественной оценки лесных пожаров различных категорий требует разработки нового усовершенствованного спектрального индекса.

Список литературы

1. Дубинин М.Ю., Луцкина А.А., Раделоф Ф.К. Оценка современной динамики пожаров в аридные экосистемы по материалам космической съёмки (на примере Черных земель) // Аридные экосистемы. 2010. №43. С. 5–16.
2. Зятькова Л.К., Елепов Б.С. У истоков аэрокосмического мониторинга природной среды («Космос» – программе «Сибирь»): монография. Новосибирск: СГГА, 2007. 380 с.
3. Bowman, D., Zhang, Y., Walsh, A., & Williams, R. (2003). Experimental comparison of four remote sensing techniques to map tropical savanna fire-scars using Landsat-TM imagery. *International Journal of Wildland Fire*, 12(4), 341–348.
4. Черепанов А.С., Дружинина Е.Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // Геоматика. 2009. №3. С. 28–32.

ПРИМЕНИМОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИНДЕКСОВ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ОЦЕНКИ ПЛОЩАДИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

5. Пушкин. А.А., Сидельник Н.Я., Ковалевский С.В. Спектральные индексы для оценки пожарной опасности лесов по материалам космической съемки с использованием ГИС-технологий в условиях рационального природопользования // Биоэкономика и экобиополитика. 2016. № 1 (2). С. 163–170.
6. Key, C. and N. Benson, N. Landscape Assessment: Remote Sensing of Severity, the Normalized Burn Ratio; and Ground Measure of Severity, the Composite Burn Index // FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System, RMRS-GTR, Ogden, UT: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 2005.
7. Chuvieco, E., M. Pilar Martin, and A. Palacios. Assessment of Different Spectral Indices in the Red-Near-Infrared Spectral Domain for Burned Land Discrimination // Remote Sensing of Environment. 2002. № 112. С. 2381–2396.

APPLICABILITY OF SPECTRAL INDEXES FOR REMOTE ASSESSMENT OF FOREST FIRE AREAS

Chernisheva M. A.¹, Shigapov I. S.², Mingaliev R. R.³

^{1,2,3}Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation

E-mail: ¹marya.chernysheva99@mail.ru, ²shigapov.irshat@yandex.ru, ³remez-z@mail.ru

The paper describe a practice of use the remote assessment for measurement of burnt forested areas, based on materials from multi-temporal satellite imagery from Landsat TM/MSS spacecraft. The technique for detecting burnt areas is based on the calculation of spectral indexes for the pre-fire and post-fire periods. The results of selection burnt areas were compared according to specialized vegetation indices: dNBR, dNDVI, dPSRI, dEVI, dBAI, dMIRBI. Estimating of errors in the measurements of the burnt areas was shown that for most cases of forest fires, estimated from high resolution satellite data, (according to the NBR, MIRBI indexes), the relative error is about 10%. In the case when the integral fire area exceeds 100 km², the error is reduced to less than 5%.

The results of experimental studies presented in this paper show that a number of spectral vegetation indices make it possible to conduct a remote assessment of the area of territories damaged by forest fires. The considered spectral vegetation indices were based on the use of simultaneous multi-temporal data reflecting the state of forest vegetation before and after exposure to fire. It was found that when assessing forest vegetation damaged by fires, satellite measurements in the red and infrared ranges have the greatest informative value. However, improving the accuracy of quantitative assessment of forest fires of various categories requires the development of a new improved spectral index.

Keywords: satellite images, fires, spectral indices, Landsat, GIS technologies, forest fires, remote sensing.

References

1. Dubinin M.Ju., Lushhekina A.A., Radelof F.K. Ocenka sovremennoj dinamiki pozharov v aridnyh jekosistem po materialam kosmicheskoy s#emki (na primere Chernyh zemel') (Assessment of the current dynamics of fires in arid ecosystems based on satellite imagery (using the example of the Black Lands)) // Aridnye jekosistemy. 2010. №43. S. 5–16. (in Russian).

2. Zyat'kova L.K., Elepov B.S. U istokov aerokosmicheskogo monitoringa prirodnoj sredy (At the origins of aerospace environmental monitoring) («Kosmos» – programme «Sibir'»): monografiya.– Novosibirsk: SGGA, 2007. 380 s. (in Russian).
3. Bowman, D., Zhang, Y., Walsh, A., & Williams, R. (2003). Experimental comparison of four remote sensing techniques to map tropical savanna fire-scars using Landsat-TM imagery. *International Journal of Wildland Fire*, 12(4), 341–348.
4. Cherepanov A.S., Druzhinina E.G. Spektral'nye svojstva rastitel'nosti i vegetacionnye indeksy (Spectral properties of vegetation and vegetation indices) // *Geomatika*. 2009. №3. S. 28–32. (in Russian).
5. Pushkin. A.A., Sidel'nik N.Ja., Kovalevskij S.V. Spektral'nye indeksy dlja ocenki pozharnoj opasnosti lesov po materialam kosmicheskoy s#emki s ispol'zovaniem GIS-tehnologij v uslovijah racional'nogo prirodopol'zovanija (Spectral indices for forest fire hazard assessment based on satellite imagery using GIS technologies in conditions of rational nature management) // *Bioekonomika i jekobiopolitika*. 2016. № 1 (2). S. 163–170. (in Russian).
6. Key, C. and N. Benson, N. Landscape Assessment: Remote Sensing of Severity, the Normalized Burn Ratio; and Ground Measure of Severity, the Composite Burn Index // *FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System*, RMRS-GTR, Ogden, UT: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 2005.
7. Chuvieco, E., M. Pilar Martin, and A. Palacios. Assessment of Different Spectral Indices in the Red-Near-Infrared Spectral Domain for Burned Land Discrimination // *Remote Sensing of Environment*. 2002. № 112. C. 2381–2396.

Поступила в редакцию 29.03.2023 г.