

Динамика спектральных свойств зарастающих травяных гарей

П.А. Украинский

Белгородский государственный национальный исследовательский университет

Белгород, Россия

E-mail: ukrainski@bsu.edu.ru

Изложены результаты исследования динамики спектральной отражательной способности зарастающих травяных гарей. Показана возможность дешифрирования выгоревших территорий в первые недели их зарастания. Выявлено более высокое значение вегетационного индекса NDVI на гарях к концу зарастания по сравнению с несгоревшими участками. Для специализированных спектральных индексов, предназначенных для изучения гарей, проведено сравнение показателя отделимости гарей от несгоревших участков. Установлено, что наиболее эффективным является индекс MIRBI.

Ключевые слова: гари, зарастание, пожары, сезонная динамика, спектральные индексы, спектральные кривые, Landsat.

Введение

Пожары – это важный фактор, влияющих на развитие травяных экосистем. Поэтому при геоботанических исследованиях важно понимание многолетней пространственно-временной динамики пожаров (Опарин и др., 2003). Получение таких сведений наземными методами трудоемко. Применение же космических снимков существенно облегчает решение этой задачи благодаря пространственному охвату и регулярности съемки (Дубинин и др., 2010).

Методы дешифрирования травяных гарей разработаны в основном для сухостепной и степной зоны с компактными, цельными и крупными ареалами травяных экосистем (Архипкин и др., 2007). Для изучения травяных палов в лесостепи эти методы применимы, но ограничено. Здесь из-за распашки практически не осталось крупных ареалов травянистой растительности. Она приурочена к узкой и разветвленной овражно-балочной сети, поймам рек. Поэтому нужны космические снимки с большим пространственным разрешением. Здесь малополезны данные MODIS, широко применяемые при изучении пожаров в более южных регионах, но весьма эффективны данные Landsat-5, 7 (Чепелев и др., 2009). Перспективны также данные Landsat-8. У них выше пространственное разрешение, большой архив съемки, и распространяются они бесплатно. Но недостатком является низкая частота съемки: раз в 16 дней. За этот период гари заметно зарастают травой, а существующие методы дешифрирования рассчитаны на обнаружение «свежих» гарей. Для разработки методов дешифрирования зарастающих гарей необходимо изучение динамики их спектральных свойств. Данное исследование направлено на описание динамики спектральных свойств зарастающих гарей и определение степени их отделимости от невыгоревших участков на различных этапах зарастания. Попутно выявляются показатели спектрального контраста, наиболее эффективные для дешифрирования зарастающих гарей.

Исследуемая территория и исходные данные

Для решения поставленной задачи выбрана исследуемая территория в Ровенском районе Белгородской области, к северу от поселка Ровеньки (рис. 1).

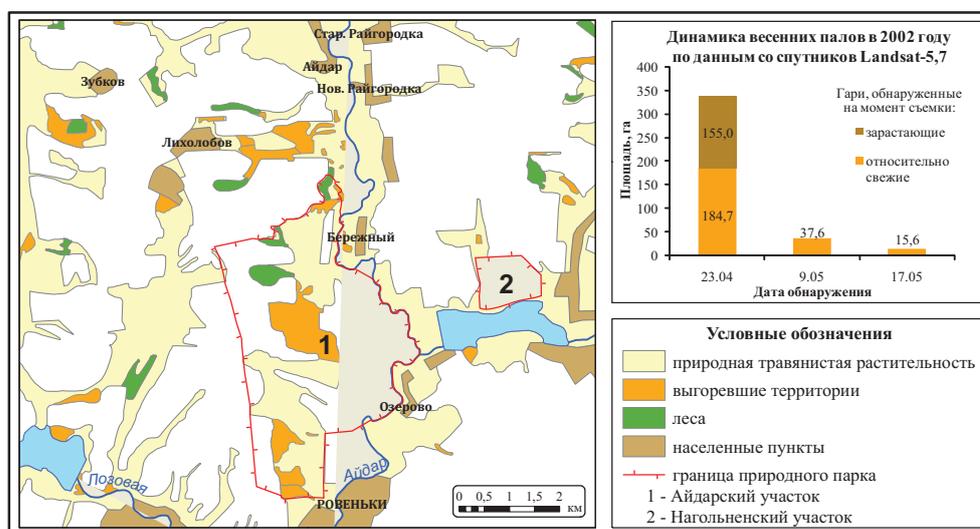


Рис. 1. Исследуемая территория

Общая площадь территории составляет 11 711 га. Из них 3772 га (32% общей площади) занято природной травянистой растительностью. Она сосредоточена в поймах реки Айдар и его притоков Сарма и Лозовая, а также в балках, выходящих к этим рекам. Здесь произрастают разнотравно-типчачово-ковыльные степи и пойменные луга. На исследуемой территории находятся два участка регионального природного парка «Ровенский» – Айдарский и Наголенский.

На исследуемой территории травяные палы проходят чаще всего весной. Поэтому для выполнения поставленной задачи необходим ряд космических снимков, охватывающий один весенний сезон. При использовании снимков с двух спутников (Landsat 5 и 7), время съемки с которых не совпадает, а спектральные характеристики снимков близки, можно максимально увеличить количество временных срезов. Исследуемая территория покрывается двумя смежными сценами съемки Landsat, что дополнительно увеличивает количество имеющихся для нее снимков. Поскольку после 2003 г. Landsat-7 поставляет дефектные данные, нужная частота съемки достижима только для периода 1999–2003 гг. Основная помеха здесь – наличие облачности на снимках. В итоге удалось подобрать подходящий ряд из пяти снимков весны 2002 г., охватывающих период с конца апреля по начало июня (табл. 1).

Таблица 1. Использованные снимки

Дата съемки	Спутник и сенсор	Номер сцены (path/row)
23 апреля	Landsat 7 ETM+	176/025
9 мая	Landsat 7 ETM+	176/025
17 мая	Landsat 5 TM	176/025
26 мая	Landsat 5 TM	175/025
11 июня	Landsat 5 TM	175/025

Все использованные снимки получены из интернет-архива USGS (www.glovis.usgs.gov). Исходные данные поставляются в формате geoTIFF, с уровнем обработки L1T. Такой уровень обработки обеспечивает точное совмещение снимков за разные даты без дополнительной географической привязки. Пространственное разрешение составляет 30 м/пиксель (тепловые каналы (60 м/пиксель) и панхроматический канал для Landsat – 7 (15 м/пиксель) не использовались).

Методы исследования

Обработка космических снимков выполнялась в программе ENVI 4.8. Предварительная обработка заключалась в радиометрической калибровке (в показатели излучения на сенсоре) и атмосферной коррекции в модуле FLAASH с пересчетом в показатели отражения в долях от целого. Тематическая обработка проходила в три этапа: 1) визуальное дешифрирование гарей, отбор гарей и нанесение областей обработки; 2) извлечение спектральных кривых из областей обработки и анализ их сезонной динамики; 3) расчет спектральных индексов и анализ их сезонной динамики.

Выбор гарей для изучения проводился по двум критериям: отсутствие перекрытия облаками на всех снимках и максимальная «свежесть» гари для начальной даты. На выбранные гари были нанесены области обработки. Также они были нанесены на соседние невыгоревшие участки, чтобы сравнить динамику спектральных свойств гарей и не пройденной палами растительности. В результате было выбрано 11 гарей общей площадью 72 га. Из областей обработки для каждой даты были извлечены, а затем сопоставлены спектральные кривые отражения гарей и негоревшей растительности. Для определения спектральной делимости на космическом снимке гарей и негоревшей травы использовалось расстояние Джефриса–Матуситы. Оно применяется в ENVI в определении качества созданных обучающих выборок для контролируемой классификации. Этот показатель меняется от 0 (идентичные объекты) до 2,0 (однозначно разные объекты). Как правило, если показатель равен 1 и меньше, то обучающие выборки не достаточно качественные для классификации с обучением.

Затем для исследуемых объектов был вычислен вегетационный индекс NDVI и специализированные индексы, используемые для изучения последствий природных пожаров (табл. 2). Индексные изображения для каждой даты были объединены в многоканальные файлы. Из созданных ранее областей обработки были извлечены кривые сезонной динамики индексов.

Таблица 2. Спектральные индексы, используемые для изучения последствий природных пожаров*

Индекс	Формула	Автор
MIRBI	$MIRBI = 10 \cdot b_7 - 9,8 \cdot b_5 + 2,0$	Trigg et al., 2001
NBR	$NBR = (b_4 - 7) / (b_4 + b_7)$	Key et al., 2002
BAI	$BAI = 1 / ((0,1 + b_3)^2 + (0,06 + b_4)^2)$	Chuvienco et al., 2002
CSI	$CSI = b_4 / b_7$	Smith et al., 2005
GEMI3	$GEMI3 = n \cdot (1 - 0,25 \cdot n) - ((b_5 - 0,25) / (1 - 0,25))$ $n = (2 \cdot (b_4^2 - b_5^2) + 1,5 \cdot b_4 + 0,5 \cdot b_5) / (b_4 + b_5 + 0,5)$	Barbosa et al., 1999

* b7, b5, b4, b3 – величина отражения в седьмом, пятом, четвертом и третьем канале Landsat TM и ETM, соответственно

Помимо одномоментных спектральных индексов для обнаружения травяных гарей могут быть полезны разностные индексы, которые показали свою эффективность для исследования последствий лесных пожаров (Барталев и др., 2010). Существует несколько формул расчета разновозрастных индексов (табл. 3). По ним рассчитывались разностные индексы для всех пяти рассмотренных специализированных спектральных индексов (табл. 2). Для этих расчетов были отобраны гари, появившиеся между 23 апреля и 9 мая (рис. 1, диаграмма).

Таблица 3. Формулы расчета разновременных индексов*

<i>Разновозрастный индекс</i>	<i>Формула</i>
Простая разность (d)	$dI = I_u - I_b$
Простое частное (r)	$rI = I_u / I_b$
Нормализованное частное (nr)	$nrI = (I_u I_b) / (I_u + 1)^{0.5}$
Нормализованная разность (nd)	$ndI = (I_u - I_b) / (I_u + I_b)$

* I – какой-либо спектральный индекс; I_u – значение этого индекса до пожара; I_b – значение этого индекса после пожара.

Для определения делимости гарей и негоревшей травы на изображениях спектральных индексов расстояние Джефриса-Матуситы не подходит, поскольку оно не рассчитывается для одноканальных изображений. Поэтому использовался показатель делимости M , предложенный Kaufman and Remer (1994): $M = |(\mu_u - \mu_b) / (\sigma_u + \sigma_b)|$, где μ_u – среднее значение для невыгоревшей территории; μ_b – среднее значение для выгоревшей территории; σ_u – стандартное отклонение для невыгоревшей территории; σ_b – стандартное отклонение для выгоревшей территории. Значение показателя M более 1,0 указывает на хорошую делимость дешифрируемых классов поверхности.

Результаты и обсуждение

На исследуемой территории обнаружено 393 га травяных гарей, что составляет 10% общей площади травянистой растительности. В пределах участка «Айдарский» природного парка «Ровеньский» обнаружено 180 га гарей (рис. 1).

Ареалы свежих травяных гарей хорошо распознаются при визуальном дешифрировании. Главный дешифровочный признак гарей – это их цвет на космическом снимке. Наиболее четко выгоревшая трава обнаруживается в комбинации каналов Landsat 7:5:3 (рис. 2). Объекты имеют в ней естественные цвета (за некоторыми исключениями), но выглядят более контрастно, чем в каналах видимого спектра. Свежие гари имеют темно-бордовый или темно-коричневый цвет.

Сравнение разновременных снимков позволило выявить закономерности изменения цвета гари. По мере зарастания гари травой в комбинации каналов Landsat 7:5:3 он меняется на бурый и палевый, а затем – на желтовато-зеленый. Постепенно цвет гарей и нетронутых огнем участков сближается, и к лету они уже неразличимы (Украинский, 2013).

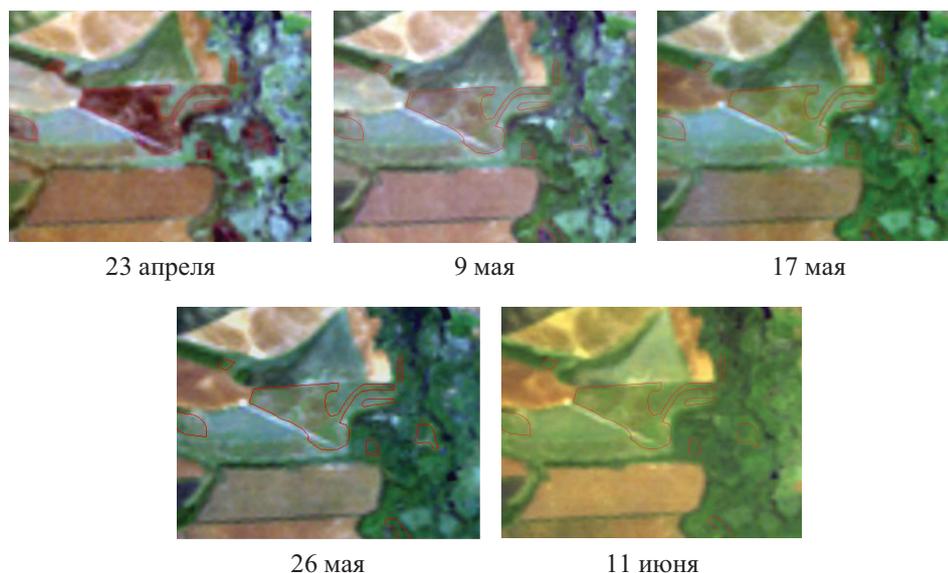


Рис. 2. Изменение цвета травяной гари (очерчена красным контуром) на космическом снимке по мере зарастания (комбинация каналов Landsat 7:5:3)

Анализ спектральных кривых отражения гарей дал следующие результаты. Для свежих гарей характерна спектральная кривая с низкими значениями отражения и увеличением их при переходе от голубой к средней инфракрасной части спектра. В видимой части спектра это увеличение слабое, а при переходе к инфракрасной части спектра оно усиливается. Изменение формы спектральной кривой отражения в течение весны связано с процессом зарастания гарей. Характерно повышение отражения в видимой части спектра и особенно в инфракрасной с формированием спектральной кривой, типичной для растительности (рис. 3).

На первом этапе зарастания (к 9 мая) формируется резкий подъем спектральной кривой отражения в ближней инфракрасной области со слабым понижением к средней инфракрасной. Изменение в ближней инфракрасной области спектра обусловлены развитием растительности – с усилением фотосинтеза увеличивается отражение в ней. На следующем этапе понижение спектральной кривой при переходе от ближней инфракрасной к средней инфракрасной области спектра становится более выраженным (к 17 мая).

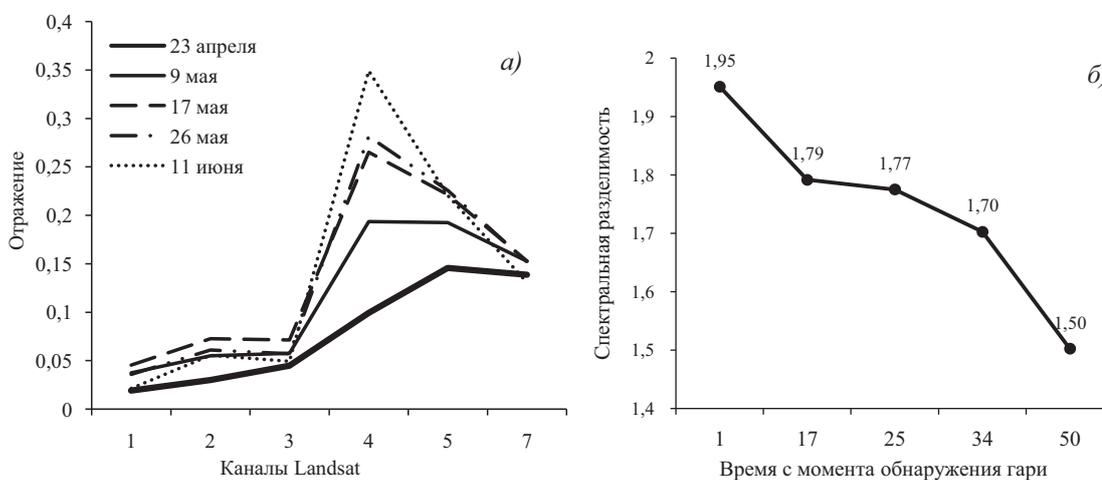


Рис. 3. Изменение спектральной кривой гарей при зарастании (а) и сезонная динамика спектральной разделимости гарей и негоревших участков (б)

Расстояние Джеффриса–Матуситы уменьшается обратно пропорционально времени, прошедшему с момента возгорания. В начале этого периода оно близко к 2,0, что указывает на высокую степень спектральной разделимости на космическом снимке гарей и невыгоревших участков. К концу периода расстояние Джеффриса–Матуситы оно понижается до 1,5 (рис. 3). В течение периода зарастания выделяется три этапа уменьшения спектральной разделимости. На первом этапе (в приведенном примере между 23 апреля и 9 мая) разделимость резко падает. На втором этапе падение разделимости замедляется. В это время зарастающую гарь можно с высокой эффективностью дешифрировать. На третьем этапе (в приведенном примере с 26 мая) разделимость снова начинает интенсивно падать. С этого времени гари уже тяжело дешифрировать, поскольку разделимость гари и негоревшей травы такая же, как и разделимость различных травянистых сообществ.

В течение весны NDVI гарей, так же как и невыгоревших участков, растет. Первоначально гари имеют более низкое значение NDVI. Но затем этот показатель становится таким же, как и для негоревших территорий, а затем и более высоким, чем на не пройденных огнем участках (рис. 4). Это связано с тем, что на гарях на значение NDVI не влияют сухие остатки прошлогодней травы. Такое поведение NDVI на выгоревших участках необходимо учитывать при анализе неоднородности растительного покрова по космическим снимкам.

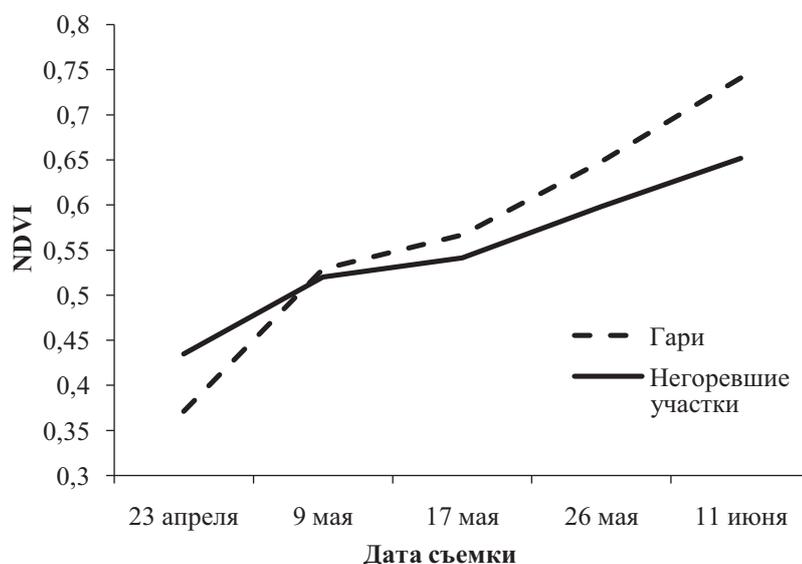


Рис. 4. Сезонная динамика NDVI травянистых палов и негоревших участков

Недоучет пирогенного фактора может привести к ошибочному выделению разных травянистых ассоциаций, в действительности представленных одной и той же растительностью. В таких случаях необходимо обращать внимание на расположение дешифрованного ареала в пространстве. Ареалы растительных сообществ располагаются сообразно рельефу, почвам, условиям увлажнения и прослеживаются на космических снимках из года в год. Для выжженных участков эти закономерности не соблюдаются. Также показателен характер границы дешифрованного ареала. У гарей границы могут иметь неестественную угловатую, «рваную форму», нехарактерную для ареалов растительных сообществ.

Анализ сезонной динамики специализированных индексов, предназначенных для изучения последствий природных пожаров, дал следующие результаты. У индексов MIRBI, BAI и NBR сезонные кривые динамики для гарей и невыгоревшей травы за рассмотренный период времени сближаются, но не пересекаются (рис. 5). Это позволяет считать их более эффективными для распознавания зарастающих гарей, чем CSI и GEM13, у которых эти кривые пересекаются. С этой точки зрения наименее эффективным следует признать индекс GEM13. Для него характерно раннее пересечение, в то время как у CSI пересечение отмечается ближе к концу периода зарастания (рис. 6).

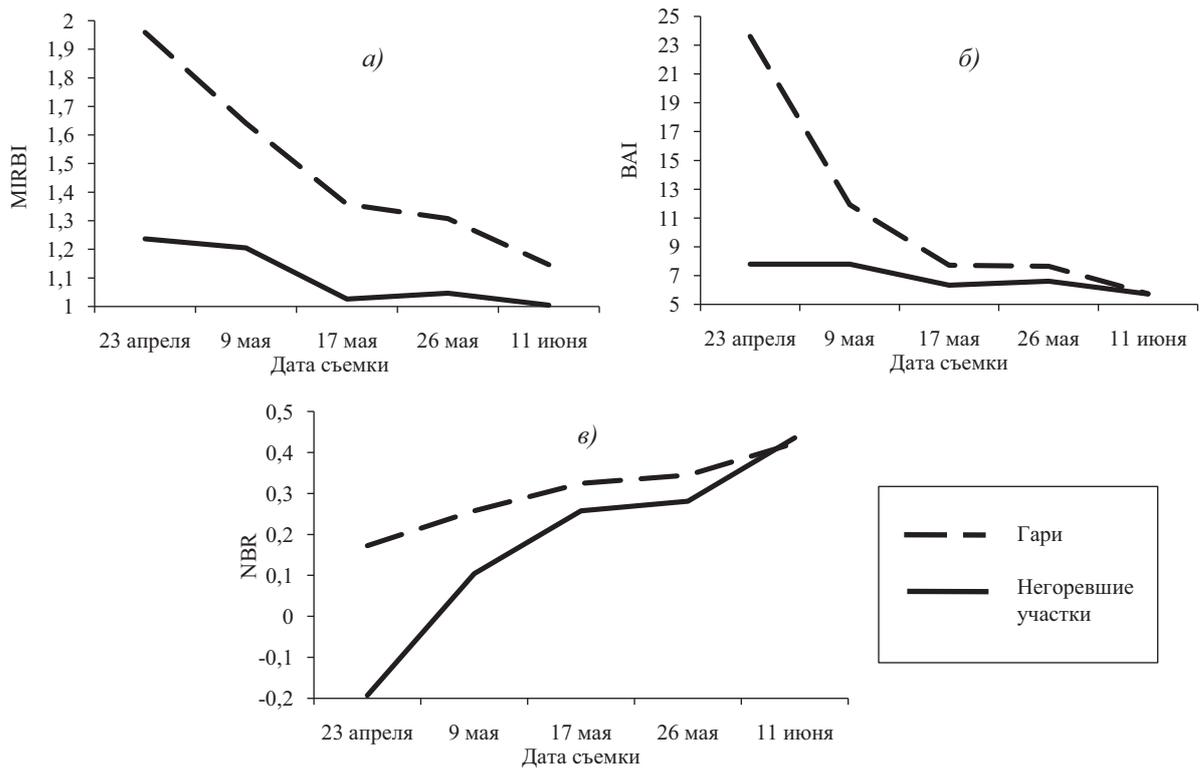


Рис. 5. Сезонная динамика индексов MIRBI (а), BAI (б) и NBR (в)

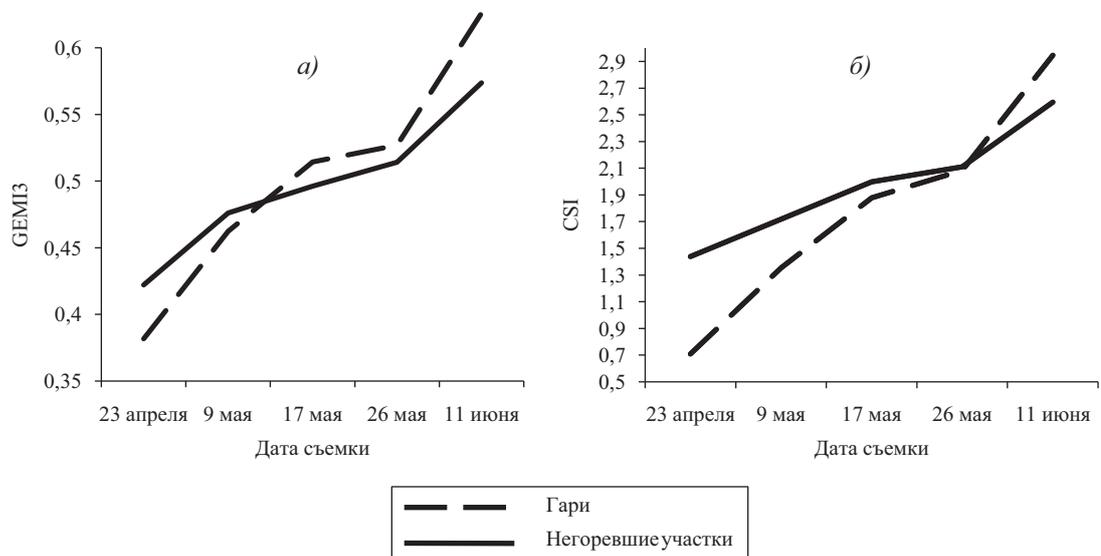


Рис. 6. Сезонная динамика индексов GEM13 (а) и CSI (б)

По существующим представлениям (Smith et. al., 2005) для выделения свежих гарей лучше подходят индексы, рассчитываемые на основе каналов средней инфракрасной части спектра, а индексы с использованием ближней инфракрасной части спектра или видимой и ближней инфракрасной части спектра дают худший результат. Сравнение динамики показателя разделимости M показало, что это справедливо и для зарастающих гарей (табл. 4).

Таблица 4. Сравнение изменения спектральной разделимости (показатель M) гарей и негоревших участков

<i>Индекс</i>	<i>Дата</i>				
	<i>23 апреля</i>	<i>9 мая</i>	<i>17 мая</i>	<i>26 мая</i>	<i>11 июня</i>
MIRBI	2,50	1,49	1,30	0,90	0,57
NBR	1,58	0,64	0,30	0,23	0,05
BAI	1,50	0,91	0,54	0,31	0,01
CSI	1,54	0,39	0,10	0,02	0,15
GEMI3	0,47	0,12	0,13	0,07	0,26

Для всех индексов разделимость падает в течение сезона. И для свежих и для зарастающих гарей показатель M самый высокий у индекса MIRBI. Далее идут индексы NBR, CSI и BAI. Самую худшую разделимость показал индекс GEMI3. Схожую картину дает и применение разновозрастных индексов (табл. 5).

Таблица 5. Сравнение спектральной разделимости (показатель M) гарей и негоревших участков по одномоментным и разновозрастным индексам

<i>Индекс</i>	<i>Одномоментный индекс</i>	<i>Разновозрастный индекс</i>			
		<i>d</i>	<i>r</i>	<i>nd</i>	<i>nr</i>
MIRBI	3,09	3,21	3,06	3,10	2,17
NBR	1,93	2,02	0,09	0,02	1,33
BAI	2,33	2,49	2,95	2,94	1,96
CSI	1,43	1,88	1,78	2,03	1,32
GEMI3	1,00	0,6	0,61	0,59	0,86

Сравнение разделимости гарей и негоревших участков по одномоментным и разновозрастным индексам дало следующие результаты (табл. 5). В целом разновозрастные индексы более эффективны. Только для GEMI3 все способа расчета разновозрастного индекса дали худший результат, чем у одновозрастного индекса. Для BAI и CSI лучший результат, чем у одновозрастного индекса дали три формулы расчета, для MIRBI – две формулы расчета, для NBR – одна. В целом, наиболее эффективным способом расчета разновременного индекса оказалась простая разность, наименее эффективным – нормализованное частное.

Выводы

Проведенное исследование показало, что травяные гари могут быть дешифрованы не только сразу после выгорания, но и течение первых недель зарастания. Это означает, что снимки Landsat, несмотря на малую периодичность съемки, могут эффективно использоваться для обнаружения гарей. При этом спектральная делимость гарей и травы на космическом снимке падает обратно пропорционально времени, прошедшему с момента выгорания, что определяет предельные сроки возможного дешифрирования.

Спектральная кривая гарей во время зарастания имеет промежуточную форму между спектральной кривой свежих гарей и спектральной кривой травянистой растительности, постепенно приближаясь к последней. При этом NDVI гарей, первоначально низкий, при зарастании повышается и становится больше, чем у невыгоревших участков. Этот факт необходимо учитывать, чтобы избежать ошибочной интерпретации различий в NDVI как различий в растительном покрове. Из специализированных спектральных индексов как свежих, так и для зарастающих гарей наибольшую делимость дает MIRBI. Эффективность его применения можно повысить путем расчета разности значений этого индекса до и после пожара.

Результаты исследования могут быть применены для дешифрирования зарастающих гарей по снимкам Landsat. Это касается не только задач текущего мониторинга, но и ретроспективных исследований. Наличие закономерностей в сезонном ходе спектральной делимости травяных гарей и негоревших участков, а также специализированных спектральных индексов, указывает на перспективу разработки методов определения возраста гарей по космическим снимкам.

Литература

1. *Архипкин О.П., Спивак Л.Ф., Сагатдинова Г.Н.* Пятилетний опыт оперативного космического мониторинга пожаров в Казахстане // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2007. Т. 1. С. 103–110.
2. *Барталев С.А., Егоров В.А., Крылов А.М., Стыценок Ф.В., Ховратович Т.С.* Исследование возможностей оценки состояния поврежденных пожарами лесов по данным много-спектральных спутниковых измерений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2010. Т. 7. № 3. С. 215–225.
3. *Дубинин М.Ю., Луцкекина А.А., Раделоф Ф.К.* Оценка современной динамика пожаров в аридных экосистемах по материалам космической съемки (на примере Черных земель) // *Аридные экосистемы*. 2010. Т. 16. № 3 (43). С. 5–16.
4. *Опарин М.Л., Опарина О.С.* Влияние палов на динамику степной растительности // *Поволжский экологический журнал*. 2003. № 2. С. 158–171.
5. *Украинский П.А.* Дешифрирование территорий, пройденных весенними травяными палами, и мониторинг ООПТ // *Материалы научно-методического семинара «ГИС и заповедные территории»*. Харьков: «Мадрид», 2013. С. 30–32.

6. *Чепелев О.А., Украинский П.А., Соловьев В.И., Свиридова А.В., Гашипоренко И.М.* Использование данных многозональной космической съемки для анализа свойств почвы и растительности в условиях европейской лесостепи // Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология. 2009. № 1. С. 55–60.
7. *Barbosa P., Gregoire J., Pereira J.* An algorithm for extracting burned areas from time series of AVHRR GAC data applied at a continental scale // Remote Sensing of Environment. 1999. V. 69. P. 253–263.
8. *Chuvieco E., Pilar M.M., Palacios A.* Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination // Remote Sensing of Environment. 2002. V. 112. P. 2381–2396.
9. *Kaufman Y.J., Remer L.A.* Detection of forests using mid-IR reflectance: an application for aerosol studies // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1994. V. 32. P. 672–683.
10. *Key C.H., Benson N.C.* Measuring and remote sensing of burn severity // U.S. Geological Survey Wildland Fire Workshop, 31 October – 3 November 2000, Los Alamos, NM (USGS Open-File Report 02–11). 2002. P. 55.
11. *Smith A.M.S., Wooster M.J., Drake N.A., Dipotso F.M., Falkowski M.J., Hudak A.T.* Testing the potential of multi-spectral remote sensing for retrospectively estimating fire severity in African savanna environments // Remote Sensing of Environment. 2005. V. 97. P. 92–115.
12. *Trigg S., Flasse S.* An evaluation of different bi-spectral spaces for discriminating burned shrub-savanna // International Journal of Remote Sensing. 2001. V. 22. P. 2641–2647.

Dynamics of the spectral properties of overgrown burned grass areas

P.A. Ukrainski

Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

E-mail: ukrainski@bsu.edu.ru

The results of studies of the dynamics of the spectral reflectance of the overgrown grass burned. The possibility of interpretation of burned areas in the first weeks of their overgrowing. Revealed a higher vegetation index NDVI for burned areas by the end of overgrowth, compared with unburned areas. For specialized spectral indices designed to study the burned areas, the comparison figure burnt separation from unburned areas. Found that the most effective is the index MIRBI.

Keywords: burned area, overgrowing, fires, seasonal dynamics, spectral indexes, spectral signatures, Landsat.