УДК 528.8:502.57:614.84

**ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ЗЕМЛИ В ИССЛЕДОВАНИЯХ СТЕПНЫХ ПОЖАРОВ****Павлейчик В.М.***ФГБУН «Институт степи» УрО РАН, Оренбург, e-mail: pavleychik@rambler.ru*

Приводится анализ апробированных способов и методов идентификации территорий, подвергшихся природным пожарам. Отмечены особенности распространения степных пожаров, ограничивающие возможности применения некоторых источников информации (быстрота распространения огня и остывания поверхности). На основе различий в яркости тонов горелых и негорелых территорий определены минимальное количество и даты космоснимков, необходимых для получения достоверного результата посредством визуального дешифрирования. Методология визуального дешифрирования апробирована на серии ключевых участков Заволжско-Уральского региона; наибольший временной охват был получен по пяти ключевым участкам общей площадью 5098 км²; для этих территорий ранее была сформирована база данных по гарям за 1984–2017 гг. Данные визуального дешифрирования сопоставлены с другими возможными источниками информации: 1) ареалы, полученные в ходе автоматизированной классификации снимков Landsat ГИС-средствами (ENVI, ArcGIS, QGIS) с использованием спектральных преобразований NBR, MIRBI, NDVI и др.; 2) данные «теплого» канала Landsat; 3) архив данных по термоточкам FIRMS (The Fire Information for Resource Management System) за 2001–2017 гг. – результат идентификации тепловых аномалий по снимкам MODIS; 4) изображения, представляющие собой интерпретацию данных по термоточкам FIRMS, выполненную SFMS (ScanEx Fire Monitoring Service) по собственному алгоритму для отображения примерных площадей природных пожаров. Делается вывод о том, что визуальное дешифрирование гарей для степных регионов остается одним из наиболее достоверных способов получения фактической информации, особенно для регионов с разреженным травянистым покровом. Автоматизированная идентификация степных гарей возможна при условии разработки алгоритма многоступенчатой обработки космоснимков, в том числе учитывающего ландшафтную неоднородность и характер землепользования.

Ключевые слова: степные пожары, гари, дешифрирование, достоверность, геоинформационные методы, дистанционное зондирование

**EXPERIENCE OF DATA APPLICATION OF REMOTE SENSING
IN STUDIES OF STEPPE FIRES****Pavleychik V.M.***Institute of Steppe of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Orenburg, e-mail: pavleychik@rambler.ru*

The analysis of the approved methods and methods of identification of areas affected by wildfires is given. The features of the spread of steppe fires that limit the possibilities of using some sources of information (the speed of spreading the fire and cooling the surface) are noted. Based on the differences in brightness of the tones of burnt and non-burnt areas, the minimum number and dates of satellite images needed to obtain a reliable result by means of visual interpretation are determined. The methodology of visual interpretation has been tested on a series of key sections of the Zavolzhie and Southern Ural region; the largest time coverage was obtained for five key sites with a total area of 5098 km²; for these territories, a database of burnt areas for the years 1984–2017 was previously formed. The data of visual interpretation are compared with other possible sources of information: 1) ranges obtained during the automated classification of Landsat images by GIS tools (ENVI, ArcGIS, QGIS) using spectral transformations of NBR, MIRBI, NDVI, etc.; 2) Landsat «thermal» channel data; 3) FIRMS (The Fire Information for Resource Management System) Thermal Data Archive for 2001–2017. – the result of the identification of thermal anomalies in the MODIS images; 4) images representing the interpretation of data on FIRMS thermal fluxes, performed by SFMS (ScanEx Fire Monitoring Service) using a proprietary algorithm for displaying approximate areas of wildfires. It is concluded that visual decay of burn areas for the steppe regions remains one of the most reliable ways to obtain factual information, especially for regions with sparse grass cover. Automated identification of steppe burns is possible subject to the development of a multi-stage processing algorithm for space images, including one that takes into account landscape heterogeneity and land use patterns.

Keywords: steppe fires, burning, interpretation, reliability, geoinformation methods, remote sensing

Обширное развитие природных пожаров, охвативших различные районы Северной Евразии в последнее десятилетие, привело к осознанию необходимости более детального изучения причин их развития, экологических и социально-экономических последствий [1–4]. Значительный современный интерес к изучению травяных по-

жаров в степных регионах во многом обусловлен:

а) открывшимися возможностями доступа к материалам дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ);

б) проблемами осуществления противопожарных мероприятий на заповедных территориях;

в) необходимостью оценки разнообразных экологических последствий;

г) увеличением ущерба населенным пунктам от распространения огня с прилегающих территорий.

Открытый огонь до сих пор используется сельхозпроизводителями для уничтожения растительных остатков и в качестве доступного способа улучшения кормовых качеств пастбищных и сенокосных угодий [4, 5]. Следует констатировать, что по степным регионам полностью отсутствуют какие-либо официальные сведения о количестве и площадях природных пожаров, что свидетельствует о недостаточном внимании к ним со стороны природоохранных служб и органов власти, несмотря на достаточно разработанную нормативно-правовую базу. Добавим, что травяные пожары, помимо непосредственного воздействия на степные экосистемы и их длительного восстановления, служат поставщиком углерода в атмосферу и влияют на изменение процессов его депонирования почвами [6].

Исходя из того, что природные пожары в настоящее время являются одним из наиболее значимых факторов формирования современных степных ландшафтов и экосистем, наиболее актуальным остается получение достоверных фактических данных, на основе которых возможно проведение анализа пространственно-временных закономерностей их развития и оценки экологических последствий. В рамках исследования получены результаты о возможности применения космоснимков, полученных значительно позже времени развития пожаров, и рассмотрены доступные варианты использования различных данных ДЗЗ.

Материалы и методы исследования

В качестве основного метода получения сведений о площадях гарей было принято визуальное дешифрирование комбинированных снимков Landsat, основанное на экспертной оценке временной серии предпожарных и постпожарных снимков с учетом характерной разницы световых тонов. Методология апробирована на серии ключевых участков Заволжско-Уральского региона; наибольший временной охват был получен по пяти ключевым участкам общей площадью 5098 км². Для этих территорий ранее [4] были дешифрированы гари за 1984–2014 гг., в рамках настоящего исследования временной ряд дополнен гарями за последние годы (2015–2017 гг.). Анализ полученной базы данных позволил выявить максимально воз-

можный многолетний ход развития пожаров и констатировать тенденцию их активизации с начала 2000-х гг. Помимо приведенных ключевых участков визуальное дешифрирование гарей на основе снимков MODIS было проведено для обширного региона (221,4 тыс. км²), охватывающего сектор степной и прилегающих к ней лесостепной и полупустынной зон в пределах Заволжья, Южного Урала, Предуралья и Зауралья, Северного Прикаспия и Приаралья за характерные (2005, 2010, 2017) годы.

Данные визуального дешифрирования были сопоставлены с другими возможными источниками информации:

1) ареалы, полученные в ходе автоматизированной классификации снимков Landsat ГИС-средствами (ENVI, ArcGIS, QGIS) с использованием спектральных преобразований NBR, MIRBI, NDVI и др.;

2) данные «теплого» канала Landsat;

3) архив данных по термоточкам FIRMS (The Fire Information for Resource Management System) за 2001–2017 гг. – результат идентификации тепловых аномалий по снимкам MODIS;

4) изображения, представляющие собой интерпретацию данных по тепловым аномалиям, выполненную SFMS (ScanEx Fire Monitoring Service) по собственному алгоритму для отображения примерных площадей природных пожаров.

Перечисленные источники информации анализировались на различных пространственных уровнях, от крупных мезорегионов до отдельных ареалов гарей. Оценка временных серий (протяженностью до 2–3 лет) классифицированных изображений и данных тепловых каналов Landsat производилась с целью выявления продолжительности и особенностей восстановления степных экосистем. Также эти исходные и преобразованные изображения Landsat рассмотрены в качестве альтернативы визуальному дешифрированию гарей, выявлена степень их достоверности при идентификации площадей пожаров. Анализ продуктов MODIS по тепловым аномалиям проведен, прежде всего, для получения обзорных сведений о степени подверженности пожарам отдельных географических регионов и в качестве потенциальных данных о многолетней динамике пожаров.

Результаты исследования и их обсуждение

Отметим, что все без исключения материалы ДЗЗ в аспекте поставленной цели

имеют одни и те же потенциальные недостатки, связанные:

а) с моментальностью и определенной периодичностью съемки (отсутствие возможности непрерывного наблюдения за развитием пожаров);

б) особенностями распространения степных пожаров (кратковременность воздействия огня и, как правило, быстротечность его распространения);

в) неблагоприятными метеоусловиями (облачность) на время получения снимков (необходимость анализа серий снимков, неопределенная достоверность данных по тепловым аномалиям);

г) недостаточно высоким пространственным разрешением космоснимков (в первую очередь MODIS), не позволяющим идентифицировать небольшие по площади гари, преобладающие в количественном выражении.

Несмотря на означенные проблемы, каждый из перечисленных источников информации может быть использован как самостоятельно (для решения каких-либо частных вопросов), так и комплексно при задаче получить максимально полную и достоверную информацию о пространственно-временных аспектах распространения природных пожаров, особенно для обширных территорий.

Опыт визуального дешифрирования

Визуальное дешифрирование космических изображений позволяет получить наиболее детальные для идентификации степных пожаров результаты, но остается весьма трудоемким процессом. С учетом редкой периодичности снимков Landsat одним из этапов оценки достоверности полученных результатов стало выявление максимальной удаленности времени получения космических изображений от времени прохождения пожара. Для анализа была выбрана одна из наиболее продолжительных временных серий, состоящая из 15 снимков Landsat за 2009 г. и одного весеннего снимка за 2010 г. для оценки возможности использования для позднеосенних гарей.

Анализировалось распределение яркости изображения по смежным горелым и негорелым участкам по пяти пожарам, наблюдавшимся в различных местах сцены в разные месяцы пожароопасного периода. Рассматриваемые пары фрагментов подбирались с условием, чтобы каждый из них располагался на однотипной поверхности. Определялось значение яркости (средние, медиана и отклонения) по гистограмме в графиче-

ском редакторе по стандартной градиентной шкале, от черного (0) до белого (255).

Исходя из того, что анализу подвергались готовые композитные изображения с различными настройками сведения, для расчетов была принята разность значений по негорелой и горелой частям (рис. 1); дополнительно приведена шкала с шагом в 5 единиц, позволяющая примерно оценить степень контрастности между рассматриваемыми негорелыми и горелыми участками и оценить полученные графики. Отмеченные различия на основе значений яркости лишь частично описывают эти различия, так как на композитных изображениях контрастно заметны и цветовые отличия – естественные участки имеют зеленовато-бежевую окраску, а гари от недавних пожаров – от черной до темно-бурой. Идентификации гарей также способствует, как правило, языковатый характер расположения границ.

Полученные результаты свидетельствуют, что композитные изображения достаточно информативны для выявления гарей визуальным способом. Естественно, чем ближе снимок по дате к дню прохождения пожара, тем контрастнее различия тонов гарей и фоновых поверхностей. Наиболее существенное снижение различий между горелыми и негорелыми территориями наблюдается в период активного нарастания растительной фитомассы, вплоть до конца мая – начала июня. Соответственно, ранневесенние (апрель – начало мая) гари могут быть достаточно объективно идентифицированы по снимкам, сделанным не позднее середины мая. Помимо возможного отсутствия снимков за этот короткий период весьма сложна идентификация характерных для региона сельскохозяйственных палов (сжигание стерневых остатков на пахотных угодьях), так как практически сразу же вслед за выжиганием проводится механизированная обработка. Гари летних пожаров достаточно хорошо визуальное дешифрируются практически вплоть до начала залегания снежного покрова. Позднеосенние пожары часто не могут быть выявлены из-за отсутствия достаточного количества пригодных для анализа снимков, в том числе из-за неустойчивой облачной погоды и выпадения снежного покрова. Пожары в этот период, как и наблюдаемые в апреле, большей частью связаны с действиями сельхозпроизводителей. В этих случаях вполне возможно использование ранневесенних снимков последующего года.

Рис. 1. Динамика разностей средних значений яркости (график) и разностей отклонений от средних значений (диаграмма) смежных негорелых и горелых территорий. Даты пожаров: А – 110 день (20 апреля, степь), Б – 123 (3 мая, степь), В – 170 (19 июня, степь), Г – 170 (19 июня, залесенная пойма), Д – 268 (25 сентября). Е – фрагмент шкалы различий яркости, по шкале от 0 (черный) до 255 (белый)

Показатели отклонений значений яркости от среднего значения до прохождения пожаров имеют значения, близкие к нулевым, так как для анализа подбираются компактные и относительно однородные участки. Вместе с тем выгорание травяной растительности «обнажает» подстилающую поверхность, что в совокупности с горелыми остатками создает более пеструю структуру изображения по яркости (рис. 1).

Исходя из вышеизложенного, минимальное количество снимков для достоверного визуального дешифрирования гарей должно быть не менее 3–4 за год. Дешифрирование одной и той же гари по материалам ДЗЗ с разным пространственным разрешением – высокого (снимки сервиса Google Earth), среднего (Landsat) и низкого (MODIS) – показывает на отсутствие значимых расхождений в ее площади, обычно не ниже 90%.

Краткие выводы о возможностях использования интерпретированных данных Landsat и MODIS

При сопоставлении многолетних данных визуального дешифрирования снимков Landsat (совокупные площади гарей по пяти ключевым участкам) и данных архива термоточек (суммарное количество, для территории Заволжско-Прикаспийского региона) выявлена высокая степень сходства этих рядов (коэффициент корреляции 0,64) за общий период – 2001–2017 гг. (рис. 2). Это означает, что интерпретация данных архива термоточек остается одним из относительно нетрудоемких способов получения информации о пространственно-временных особенностях развития пожаров. В сочетании с наличием атрибутивной информации по дате и времени каждой термоточки этот источник данных можно использовать при сопоставлении с другими данными (в том числе и в суточном

выражении), например для изучения роли погодно-климатических условий.

Следует заметить, что быстрое прохождение степных пожаров и немного менее скоротечное остывание поверхности приводит к тому, что тепловые аномалии из снимков MODIS отображают лишь положение огневого фронта на момент съемки. Соответственно, длительно развивающиеся пожары обычно отображены в виде двух и более (по количеству снимков) групп термоточек, соответствующих положению фронта пожара. «Моментальность» съемки и получаемых данных приводит к тому, что в основном фиксируются обширные пожары (площадью более 5 км²), хотя и по таким возгораниям встречаются «пропуски» данных. По этой же причине менее значимые по площади и одновременно наиболее часто отмечающиеся пожары зачастую вообще не фиксируются. Эти недостатки наследуются и интерпретированным данным – площадям активных пожаров, полученным алгоритмами SFMS, значения которых в среднем составляют 25–35% от совокупной фактической площади гарей и до 40–45% для отдельных крупных гарей.

Данные теплового канала Landsat и изображения, полученные в ходе проведения спектральных преобразований (NBR, MIRBI, NDVI и др.), позволяют решить две крупных задачи:

1) автоматизированно получить ареалы гарей, близкие к фактическим;

2) проследить продолжительность восстановительных процессов в различных ландшафтно-географических условиях.

В этих целях нами рассмотрена 3-летняя серия снимков, позволившая посредством анализа температурного фона выявить продолжительность и пространственные закономерности постпожарных сукцессий [7]. Было выявлено, что температура поверхности гарей в теплый период в среднем выше на 2,5–4,0°C; на следующий год эти различия повсеместно остаются, снижаясь до 1,5–2,0°C; и лишь на третий год после пожара (к окончанию полного второго вегетационного периода) различия практически нивелируются (в среднем 0,2°C).

Серией исследований нами также выявлено, что выгоревшие участки могут быть эффективно дешифрированы применением специализированных индексов NBR и MIRBI; менее достоверно использование нормализованного относительного индекса растительности NDVI и метода классификации ISODATA [8]. При этом в период активного нарастания фитомассы (со второй половины мая до конца июня) достоверность резко снижается, но затем вновь достигает 80–95% от фактических площадей. Главным недостатком использования автоматизированных методов анализа материалов ДЗЗ в степных регионах является необходимость проведения дополнительных работ по выявлению возделываемых полей, поверхность которых дает «отклик», неотличимый от сгоревших территорий.

Рис. 2. Данные многолетней (1984–2017) динамики совокупных площадей степных пожаров и численности термоточек по Заволжско-Прикаспийскому региону

Заключение

Визуальное дешифрирование гарей для степных регионов остается одним из наиболее достоверных способов получения фактической информации, особенно для регионов с разреженным травянистым покровом [9]. Методология автоматизированной идентификации гарей геоинформационными средствами постоянно развивается [10], но с учетом особенностей распространения степных пожаров применима лишь для отдельных аспектов интересующей проблемы. Идентификация гарей для обширных степных регионов возможна при условии разработки алгоритма многоступенчатой обработки материалов ДЗЗ, в том числе учитывающего ландшафтную неоднородность и характер землепользования.

Исследование выполнено в рамках гранта РФФИ № 18-05-00088 «Природные пожары в степных регионах Евразии: анализ пространственно-временных закономерностей и геоэкологических последствий».

Список литературы / References

1. Dubinin M., Potapov P., Lushchekina A., Radeloff V. Reconstructing long time series of burned areas in arid grasslands of southern Russia by satellite remote sensing // *Remote Sensing of Environment*. 2010. V. 114. P. 1638–1648.
2. Ткачук Т.Е. Динамика площадей степных пожаров на юге Даурии в первом десятилетии XXI века // *Ученые записки Забайкал. гос. ун-та*. 2015. № 1 (60). С. 72–79.
3. Ткачук Т.Е. Dynamics of areas of steppe fires in the south of Dauria in the first decade of the XXI century // *Uchenye zapiski Zabaykal. state university*. 2015. № 1 (60). P. 72–79 (in Russian).
3. Шинкаренко С.С. Анализ распространения степных пожаров и идентификация пожароопасных территорий на основе геоинформационных технологий // *Научный альманах*. 2015. № 8 (10). С. 1240–1244.
- Shinkarenko S.S. Analysis of the spread of steppe fires and the identification of fire hazardous areas based on geoinformation technologies // *Scientific Almanac*. 2015. № 8 (10). P. 1240–1244 (in Russian).
4. Павлейчик В.М., Чибилёв А.А. Степные пожары в условиях заповедного режима и изменяющегося антропогенного воздействия // *География и природные ресурсы*. 2018. № 3. С. 38–48.
- Pavleichik V.M., Chibilyov A.A. Steppe fires in the conditions of the reserve regime and the changing anthropogenic impact // *Geography and natural resources*. 2018. № 3. P. 38–48 (in Russian).
5. Laris P. Burning the seasonal mosaic: Preventative burning strategies in the wooded savanna of southern Mali // *Human Ecology*. 2002. Vol. 30. Is.2. P. 155–186.
6. Смялянский И.Э. Роль степных экосистем России в депонировании углерода // *Степной бюллетень*. 2012. № 35. С. 4–8.
- Smelyansky I.E. The role of the steppe ecosystems of Russia in carbon deposition // *Steppe Bulletin*. 2012. № 35. P. 4–8 (in Russian).
7. Павлейчик В.М., Мячина К.В. Особенности термического режима земной поверхности после степных пожаров по данным спутников Landsat // *Вестник Оренб. гос. ун-та*. 2016. № 4 (192). С. 83–89.
- Pavleichik V.M., Myachina K.V. Features of the thermal regime of the earth's surface after the steppe fires according to Landsat satellites // *Bulletin Orenb. state university*. 2016. № 4 (192). P. 83–89 (in Russian).
8. Мячина К.В., Павлейчик В.М., Чибилев А.А. Проблемы и возможности геоинформационных методов при выявлении степных гарей // *Проблемы региональной экологии*. 2016. № 6. С. 159–166.
- Myachina K.V., Pavleichik V.M., Chibilev A.A. Problems and possibilities of geo-information methods in identifying steppe mountains // *Problems of regional ecology*. 2016. № 6. P. 159–166 (in Russian).
9. Шинкаренко С.С. Оценка динамики площадей степных пожаров в Астраханской области // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 1. С. 138–146.
- Shinkarenko S.S. Assessment of the dynamics of areas of steppe fires in the Astrakhan region // *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2018. Vol. 15. № 1. P. 138–146 (in Russian).
10. Stroppiana D., Bordogna G., Carrara P., Boschetti M., Boschetti L., Brivio P.A. A method for extracting burned areas from Landsat TM/ETM+ images by soft aggregation of multiple Spectral Indices and a region growing algorithm. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2012. T. 69. P. 88–102.