

## ОСОБЕННОСТИ ТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОСЛЕ СТЕПНЫХ ПОЖАРОВ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ LANDSAT

Пожары являются неотъемлемым явлением степных регионов. Вместе с тем практически неизученными остаются вопросы идентификации многообразных геосистемных последствий травяных пожаров. Особую актуальность подобные исследования приобретают в условиях отмечающейся в последние 15–20 лет активизации пожарных явлений.

В статье предлагается анализ микроклиматических особенностей степных экосистем, подвергшихся пожарам и находящихся на стадии восстановительных сукцессий. в качестве основного оцениваемого параметра принята температура поверхности, значения которой получены в результате интерпретации данных «тепловых» каналов спутниковых изображений Landsat.

Для получения данных об особенностях температурного режима гарей и о продолжительности восстановительных процессов использована серия космических изображений, охватывающая время до и после пожаров 2009 и 2014 годов, наблюдавшихся на ключевом участке Урало-Илекского междуречья.

Полученные данные по постпожарным снимкам свидетельствуют о том, что температурные различия в смежных (горелой и негорелой) частях обычно не превышают 4°C в летний период и постоянно снижаются вплоть до окончания второго вегетационного года. Выявлено, что повышенный тепловой фон гарей (особенно поздне-осенних пожаров) в сочетании с отсутствием плотного растительного покрова приводит к значительному сокращению мощности и длительности снегового покрова, что, соответственно, отражается на ухудшении условий весеннего увлажнения. Анализ ландшафтно-экологической структуры территории позволил выявить, что основным фактором, определяющим продолжительность восстановительных процессов, является постоянное повышенное увлажнение.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что тепловой режим земной поверхности является одним из показателей, на основании которого можно сформулировать опосредованные выводы о состоянии и динамике растительного покрова.

Ключевые слова: степные пожары, гарь, температурный режим, восстановительные процессы, космические изображения Landsat.

Пожары являются неотъемлемым явлением степных регионов как в историческом аспекте, так и в настоящее время [1], [2]. Они имеют важное значение в формировании видовой и ценологической структуры степных экосистем, поэтому анализ воздействия пирогенного фактора и постпирогенных сукцессий вызывает традиционный интерес у исследователей [3]–[5]. Вместе с тем, практически неизученными остаются вопросы, связанные с комплексным изучением многообразных последствий уничтожения растительного покрова огнем в степных регионах. Отсутствие значимых работ в этом направлении отчасти обусловлено невозможностью, до недавнего времени, доступа к такому источнику исходных материалов, как архивы данных дистанционного зондирования Земли.

Существует значительное количество как российских, так и зарубежных исследований, демонстрирующих возможности использования данных космической съемки для мониторинга экосистем, подвергающихся воздействию пи-

рогенного фактора. Изучаются возможности выявления гарей и восстановительных процессов на основе тематической обработки данных дистанционного зондирования различных географических регионов и природных зон Земли [6]–[10]. С опытом использования изображений Landsat для измерения температуры поверхности можно ознакомиться в ряде работ [11], [12].

В данном исследовании мы предлагаем анализ особенностей микроклиматических условий степных гарей (в первую очередь – температуры подстилающей поверхности) и оценку продолжительности восстановительных процессов. Также были рассмотрены последствия пожаров, выраженные в изменениях условий увлажнения и снегового режима, обусловленные особенностями термического режима гарей и отсутствием на них сомкнутого растительного покрова. Характер залегания снегового покрова также отслеживался при помощи изображений спутников Terra и Aqua.

**Методика исследований  
и исходные материалы**

В качестве исходных данных для получения сведений о температурном режиме поверхности использовались серия разносезонных спутниковых изображений Landsat TM и ETM (данные «теплого» инфракрасного диапазона, TIR, thermal infrared), предоставляемых Геологической службой США (USGS). Сравнительный анализ температурных показателей производился на примере серии осенних пожаров, наблюдавшихся в 2009 и 2014 годах на части Урало-Илекского междуречья.

Выбор района исследования обосновывался наличием крупных массивов неиспользуемых земель, что является основной причиной частого и обширного развития пожарных явлений. При площади участка около 1,5 тыс. км<sup>2</sup> пахотные угодья занимают порядка 20%, залежные земли – 15%; остальная территория используется в качестве пастбищных угодий и как земли заповедного фонда. Центральное положение занимает участок государственного заповедника «Оренбургский» «Буртинская степь» (45 км<sup>2</sup>). За исключением сельскохозяйственных угодий на участке практически отсутствуют другие виды антропогенных объектов (населенные пункты, автомобильные дороги и др.), способные ограничить распространение огня. Приводораздельное положение участка определяет отсутствие крупных водотоков, которые могли бы являться значимой преградой для распространения пожаров. Таким образом, отсутствие природных и антропогенных рубежей в сочетании со значительной долей малоиспользуемых угодий способствовало формированию обстановки, благоприятной для возникновения и обширного распространения пожаров. Проведенные ранее

исследования [13] свидетельствуют о том, что современный уровень развития пожарных явлений, как на непосредственно исследуемом участке, так и в целом для степей Заволжско-Уральского региона, сформировался к середине 1990-х годов с тенденцией увеличения количества и площади возгорания. Сходные тенденции наблюдаются и в аридных условиях Северного Прикаспия [14], что может свидетельствовать о макрорегиональном охвате процессов активизации пожаров.

Серия космических изображений включала как снимки, предшествующие событию пожара и отражающие естественные неповрежденные характеристики территории, так и временной ряд изображений, выполненных после пожаров, демонстрирующих восстановительный характер и разнообразие постпожарных состояний ландшафтов в различные сезоны года (табл. 1). Одинаковое время съемки каждого из изображений (11:03 местного времени) позволяет сопоставлять полученные данные.

Перед процессом тематической обработки снимки прошли стандартный уровень геометрической и радиометрической калибровки с пересчетом показателей из цифровых отсчетов в коэффициент спектральной яркости. Подобная обработка позволяет снизить влияние различных условий съемки ряда используемых изображений при анализе конечных результатов интерпретации спутниковых материалов. Тематическая обработка снимков проходила в два этапа: визуальное дешифрирования гари и извлечение данных температуры подстилающей поверхности из областей обработки.

Различия в температурном режиме между горелыми и негорелыми участками анализировались двумя способами: 1) в площадном вы-

Таблица 1. Каталог использованных снимков Landsat

Состояние ландшафтов	Пожар 24.09.2009 г.		Пожар 31.07.2014 г.	
	дата съемки	№ снимка	дата съемки	№ снимка
Предпожарное	17.06.2009	2009-168	02.08.2014	2014-214
Постпожарное	23.10.2009	2009-264	19.09.2014	2014-262
	03.02.2010	2010-034	30.03.2015	2015-089
	27.06.2010	2010-178	15.04.2015	2015-105
	08.09.2010	2010-251		
	13.05.2011	2011-133		
	01.08.2011	2011-213		

ражении на основе подготовленных температурных картосхем; 2) посредством построения температурных графиков по линиям профилей (рис. 1).

Для анализа роли ландшафтной основы в формировании температурного фона до и после рассматриваемого пожара нами построена серия схем по перечисленным выше датам. Схемы построены с шагом в  $1^{\circ}\text{C}$ , который достаточен для выявления различий между горелыми и негорелыми участками и позволяет оценить различия в восстановительных процессах в различных типах ландшафтов. Так, согласно литературным данным [15], точность измерения температуры подстилающей поверхности на основе изображений Landsat колеблется от  $1,3$  до  $2^{\circ}\text{C}$ .

При выборе участков для профилей мы основывались на относительной однотипности рельефа и характера землепользования. в качестве профилей выбраны 4 отрезка длиной около 1 км (34 пикселя изображения Landsat) и шириной 30 м (1 пиксель), центральными узлами которых являются площадки, расположенные на границе гари 2009 года. от центральных площадок в двух направлениях – в глубь гари и в сторону негоревшей территории отложены

векторы одинаковой длины (500 м), составляющие, в результате, анализируемые километровые отрезки. с использованием по ENVI 5.3 выполнено измерение температуры подстилающей поверхности для каждого пикселя каждого отрезка на основе термических каналов Landsat.

### Обсуждение результатов

#### Анализ пространственных (ландшафтных) особенностей термического режима горелых и негорелых территорий

Фоновый температурный режим в теплые сезоны года на исследуемом участке имеет довольно сложно дифференцированную пространственную структуру с широким диапазоном температур.

Так, для предпожарного снимка (2009-168) амплитуда температур составляет  $24^{\circ}\text{C}$  ( $+21 - +45^{\circ}\text{C}$ ). Основными факторами, определяющими температуру поверхности являются: а) плотность травостоя (степень покрытия поверхности); б) наличие водных объектов и территорий с повышенным увлажнением; в) экспозиция и величина уклона поверхности склонов. Температура пахотных угодий находится в тесной зависимости от стадий обработки земли и вегетации культурных растений, поэтому пашни

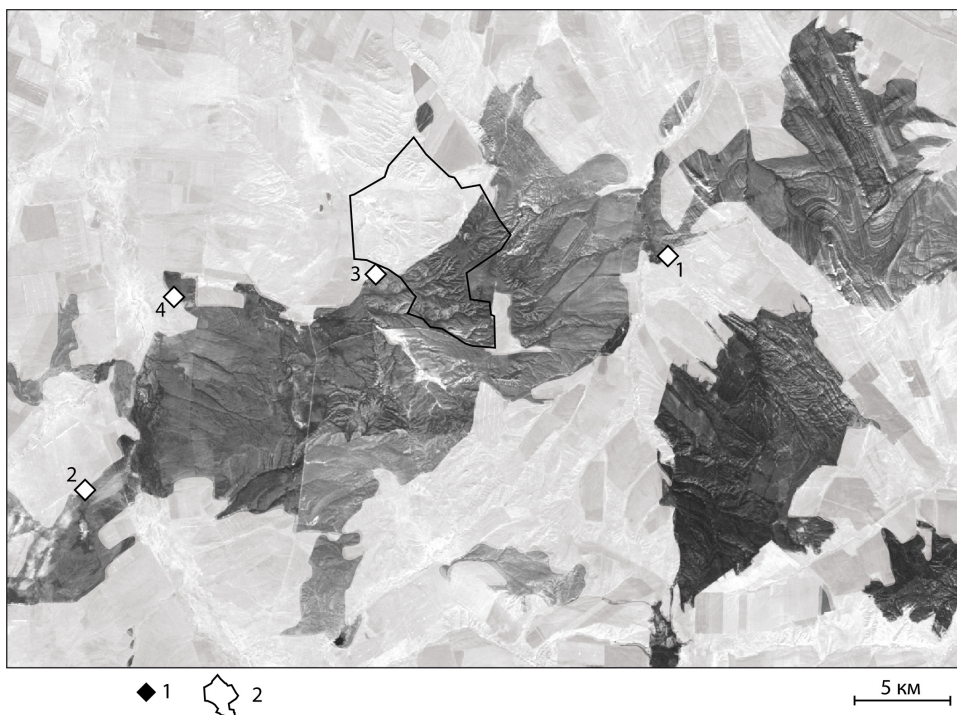


Рисунок 1. Контуры гарей на снимке Landsat (2009-264).  
1 – положение температурных профилей,  
2 – граница участка заповедника «Оренбургский» «Буртинская степь»

отличаются наиболее значительной амплитудой температурных значений, как в положительную, так и в отрицательную сторону от средних значений. Относительно пониженной температурой (обычно на 5–7°C) поверхности характеризуются овражно-балочные, долинно-речные и карстовые озерно-западинные ландшафты, склоны северной экспозиции и в целом территория заповедного участка «Буртинская степь». При этом диапазон с минимальными температурами (+21 – +25°C) относятся исключительно к водным поверхностям и околородным пространствам. Максимальные температуры (+39 – +45°C) характерны для вспаханных угодий и покатых склонов южной экспозиции. Диапазон температур +29 – +37°C охватывает большую часть как условно естественных экосистем (сенокосы и пастбища) – 1,16 тыс.км<sup>2</sup>, или 77% от площади участка. Именно в этот диапазон укладывается 91% территории, впоследствии подвергшейся пожару в конце сентября 2009 года.

Снимки 2009-296 и 2014-214, на которых отображены действующие на момент съемки фронты пожаров свидетельствуют о следующем. Сенсоры Landsat способны зафиксировать наиболее «горячие» участки фронта пожаров в виде тепловых аномалий округлой формы с диаметром обычно около 100–150 м с температурным максимумом в центре и минимумом на периферии. Естественно, что при разрешении снимка в 30 м температурные значения такого небольшого по площади объекта, как фронт (или очаг) пожара, являются усредненными. Поэтому диапазон температур непосредственно в очагах фиксируется в пределах 39,5–45,5°C для снимка 2014-214 и 29–37°C для снимка 2009-296. Кратковременность воздействия огня не приводит к формированию шлейфа с повышенными температурами, следующего за фронтом пожара. по подготовленным схемам отчетливо видно, что после прохождения огневого фронта поверхность земли практически моментально остывает до значений, соответствующих уровню инсоляции.

Данные постпожарных снимков свидетельствуют, что температурные различия в смежных (горелой и негорелой) частях в теплые сезоны года обычно не превышают 4°C. Более значительные различия (до 6–8°C) наблюдаются лишь

там, где граница пожара проходит по зонам сочленения степных местностей с урочищами, изначально отличающихся более низкими температурами. Температурные различия между горелыми и негорелыми участками максимальны в летний период и сохраняются в течение всех теплых сезонов года, вплоть до наступления постоянных отрицательных температур.

Таким образом, в условно естественном до-пожарном состоянии растительность во многом нивелирует температурный фон поверхности за счет частичного затенения поверхности и образования особых микроклиматических условий в приповерхностном слое. Сложная ландшафтная структура рассматриваемого участка определяет и высокую неоднородность растительных сообществ, соответственно – таких взаимозависимых показателей, как видовой состав, участие древесно-кустарниковых элементов, плотность травостоя, проективное покрытие, наличие степного войлока и др.

Сопоставление температурных данных по основным морфоструктурным элементам ландшафтов позволяет выявить различия в активности восстановительных процессов. Согласно полученным схемам в наибольшей степени постпожарные изменения отражаются на увлажненных экотопах – лесные урочища, заросли степных кустарников по днищам и склонам балок, разнотравно-вейниковые луговины вдоль водотоков и в карстовых понижениях. Восстановление древесного и кустарникового покровов происходит в длительные сроки, но сопутствующий травяной покров, находясь в благоприятных условиях увлажнения, в кратчайшие сроки вегетационного периода накапливает фитомассу, соответственно быстро восстанавливается и пониженный температурный режим. с другой стороны, после пожара более значительными становятся температурные различия, обусловленные экспозиционной неоднородностью поверхности. Склоны южных экспозиций становятся более «горячими», а северных экспозиций – более «холодными».

Еще одной особенностью поздне-осенних гарей является отсутствие травяного (и местами сопутствующего кустарникового) покрова ко времени формирования снегового покрова, что отражается на условиях весеннего увлажнения территории, что, в свою очередь, определяет ин-

тенсивность постпожарной вегетации. Особенно велико значение гарей в малоснежные годы, к примеру – в зимний сезон 2014–2015 годов. После поздне-осеннего пожара 2014 г. в течение всего холодного периода в границах гарей не был образован повсеместный и устойчивый снеговой покров. Начало оттаивания снега в марте 2015 г. явилось той критической точкой, после которой отмечалось активное нарастание площади открытой поверхности на гари ввиду высокой инсоляционно-поглощающей способности. Соответственно, температурный режим поверхности на снимке 2015-089 (30 марта) контрастно дифференцировался от  $-7$  до  $0^{\circ}\text{C}$  на негорелых участках до  $0 - +12,5^{\circ}\text{C}$  в пределах гарей, тем самым амплитуда практически достигала летних значений.

В последующую после пожаров (особенно произошедших поздней осенью) весну более раннее оттаивание снега в сочетании с усиленным прогреванием поверхности способствует массовой вегетации и цветению эфемеров и эфемероидов. в течение всего остального

вегетационного периода характер и интенсивность восстановления растительного покрова во многом зависит от погодных условий, особенно, ввиду засушливости степных и полупустынных территорий, – от увлажнения.

Таким образом, специфические условия гарей резко контрастируют с фоновыми территориями как по температурным показателям, так и по другим микроклиматическим параметрам (увлажнение талыми водами, глубина промерзания почвенного покрова и др.).

**Анализ термического режима смежных горелых и негорелых территорий посредством температурных профилей**

На основе подготовленных температурных схем за 2009–2011 годы были получены данные, отражающие различия смежных горелых и негорелых территорий по линиям профилей, расположенных в поперечном направлении относительно границ гари.

На приведенном ниже рисунке (рис. 2) отображены средние значения температур по трем наиболее однородным профилям (2–4), рас-

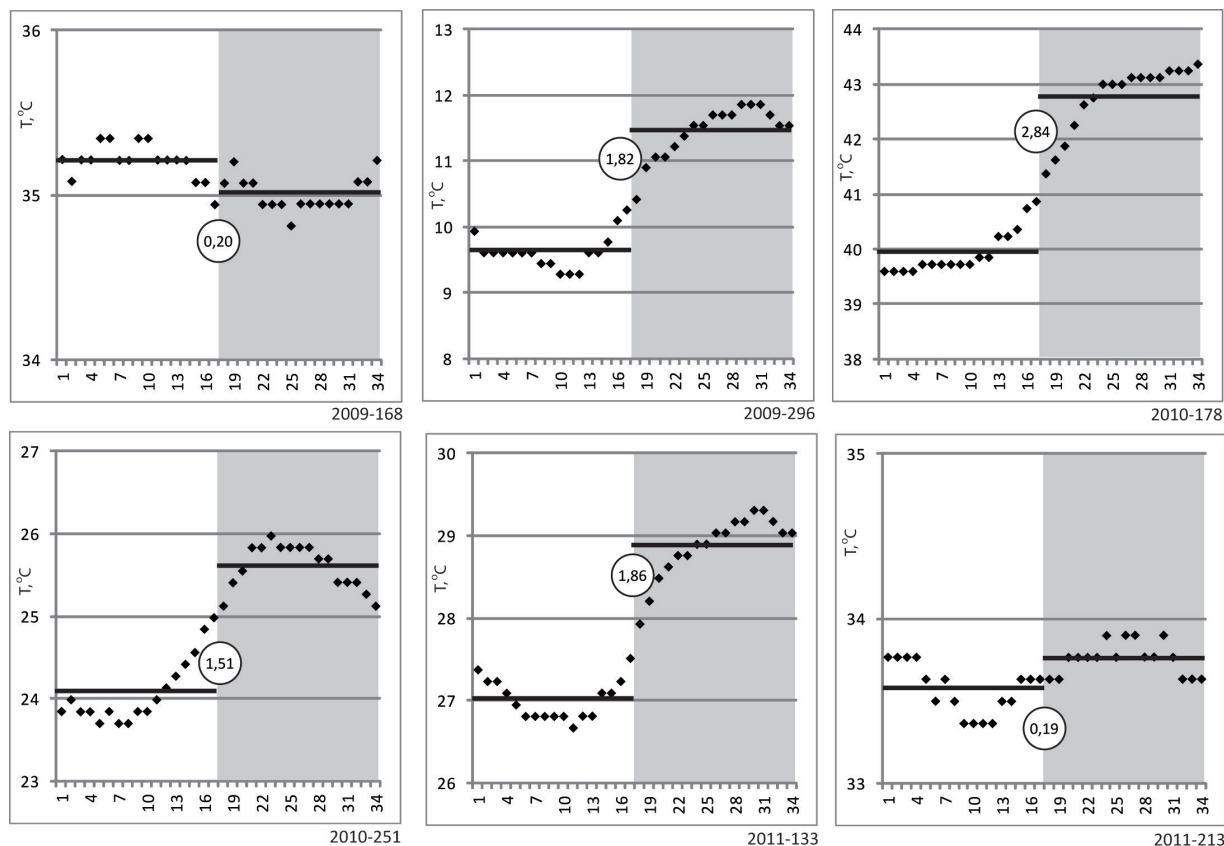


Рисунок 2. Средние значения совокупных температур по профилям

пределенные по датам постпожарных снимков. В виде горизонтальных отсечек отображена средняя величина всех данных с разбивкой на горелые и негорелые участки.

Графики, построенные на основании этого подхода, позволяют наглядно фиксировать тенденции в восстановительной динамике с учетом сезонных различий в температурном режиме. На протяжении всего 2010 г. эти различия остаются значительными, максимальных значений достигают в летние месяцы, а осенью, с сокращением инсоляции и понижением общих температур – снижаются, но остаются практически на уровне 2009 г. в первой половине 2011 г. различия между горелыми и негорелыми участками остаются на высоком уровне, но к окончанию вегетации большинства видов в начале августа уже достигают в среднем  $0,2^{\circ}\text{C}$ .

Таким образом, на основе полученных данных можно констатировать, что различия между горелыми и негорелыми участками постоянно снижаются и нивелируются к концу второго вегетационного года. За это время общее проективное покрытие растительности (включая растительный войлок) и общая фитомасса достигают значений, примерно соответствующих негорелым участкам, что свидетельствует о восстановлении микроклиматических условий. Дальнейшие постпирогенные сукцессии в степных фитоценозах более длительные и оцениваются в срок до 8–10 лет [2], [16]. Отметим, что данные о продолжительности восстановления температуры поверхности после степных пожаров немногочисленны. Так, по сведениям А.В. Грибкова [17] различия в температурном режиме почв пирогенных и контрольных участков сохраняются на протяжении четырех лет. Эти исследования проводились в различных фитоценозах забайкальских степей (государственный природный заповедник «Даурский»), способ и методика получения данных в публикации указаны не были.

### **Заключение**

Воздействие огня на биотические и биокосные компоненты инициирует серию взаимосвязанных преобразований в микроклимате степных экосистем. Наиболее явными последствиями пожаров в этом аспекте являются: а) изменение теплового режима поверхности;

б) пониженная мощность снегового покрова, сокращение продолжительности его залегания; в) усиленное промерзание зимой и пониженное увлажнение весной почвенного покрова. Эти трансформации, носящие системный характер, формируют особые экотопические условия, на фоне которых происходят восстановительные процессы. При этом, растительность в условиях гарей после позднелетних и осенних пожаров находится в довольно специфических (а в зимнее время – экстремальных) гидротермических условиях.

Проведенные исследования позволяют сформулировать следующие выводы:

1. Космические изображения Landsat фиксируют наиболее «горячие» участки фронта пожаров в виде локальных тепловых аномалий. Значения температур, конфигурации и размеры этих аномалий свидетельствуют о том, что прохождение огневого фронта носит кратковременный характер и не приводит к существенному нагреванию земной поверхности.

2. Уничтожение растительного покрова на первых послепожарных этапах приводит к разнонаправленным трансформациям теплового режима – диапазон температур частично выравнивается за счет «нагрева» увлажненных экотопов и, одновременно, резко дифференцируется за счет экспозиционной неоднородности поверхности.

3. Гари в целом характеризуются повышенными значениями температур, в среднем на  $2-4^{\circ}\text{C}$  выше средней температуры фоновых (негорелых) территорий. Эти различия достигают максимальных значений в летний период, постоянно снижаются вплоть до окончания второго вегетационного года.

4. Основным фактором, определяющим скорость восстановительных процессов, является увлажнение. Постоянное повышенное увлажнение некоторых экотопов способствует восстановлению температур до предпозарного состояния за счет более активной вегетации и восстановления плотного травяного покрова, даже несмотря на возможное уничтожение кустарникового и древесного элементов.

В дальнейших исследованиях мы планируем сопоставить собственные результаты с первичными данными инструментальных измерений (температура, влажность, высота снегового

покрова) в рамках системы постпожарного мониторинга на заповедном участке «Буртинская степь». Это позволит оценить степень достоверности термических данных снимков Landsat

и выявить возможность применения сведений о сезонных и многолетних изменениях температуры поверхности в различного рода экологических и географических исследованиях.

13.04.2016

**Статья подготовлена в рамках НИР ИС УрО РАН №01201351529 и проекта №15-12-5-50  
Комплексной программы Уральского отделения РАН**

**Список литературы:**

1. Тишков А.А. Пожары в степях и саваннах // Вопросы степеведения. Вып. VII. Оренбург, 2009. – С. 79-83.
2. Степные пожары и управление пожарной ситуацией в степных ООПТ: экологические и природоохранные аспекты. Аналитический обзор. – М.: Изд-во Центра охраны дикой природы, 2015. – 144 с.
3. Родин Л.Е. Пирогенный фактор и растительность аридной зоны // Ботанический журнал, 1981. – Вып. 66. – С.1673-1684.
4. Опарин М.Л., Опарина О.С. Влияние палов на динамику степной растительности // Поволжский экологический журнал, 2003. – №2. – С.158-171.
5. Ильина В.Н. Пирогенное воздействие на растительный покров // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. – Самара, 2011. – Т.20, №2. – С.4-30.
6. Барталев С.А., Егоров В.А., Крылов А.М. и др. Исследование возможностей оценки состояния поврежденных пожарами лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2010. – Т. 7. – №. 3. – С. 215-225.
7. Куулар Х.Б. Оценка гарей Уюкского хребта на основе данных Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10. – №. 4. – С. 239-244.
8. Украинский П.А. Динамика спектральных свойств зарастающих травяных гарей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10. – №4. – С. 229-238
9. Wimberly M.C., Reilly M.J. Assessment of fire severity and species diversity in the southern Appalachians using Landsat TM and ETM+ imagery // Remote Sensing of Environment. – 2007. – Т. 108. – №. 2. – P. 189-197.
10. Veraverbeke S. Lhermitte, S., Verstraeten, W.W., & Goossens, R. The temporal dimension of differenced Normalized Burn Ratio (dNBR) fire/burn severity studies: the case of the large 2007 Peloponnese wildfires in Greece // Remote Sensing of Environment. – 2010. – Т. 114. – №. 11. – P. 2548-2563.
11. Zhang Y., Balzter, H., Zou, C., Xu, H., & Tang, F. Characterizing bi-temporal patterns of land surface temperature using landscape metrics based on sub-pixel classifications from Landsat TM/ETM+ //International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2015. – Т. 42. – P. 87-96.
12. Vlassova L., Pérez-Cabello F. Effects of post-fire wood management strategies on vegetation recovery and land surface temperature (LST) estimated from Landsat images // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2016. – Т. 44. – P. 171-183.
13. Павлейчик В.М. Пространственно-временная структура пожаров на заповедном участке «Буртинская степь» // Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН, 2015. – Вып. 4. – С. 1-11. [Электронный ресурс] (URL: <http://elmag.uran.ru:9673/magazine/Numbers/2015-4/Articles/PVM-2015-4.pdf>)
14. Дубинин М.Ю., Луещкина А.А., Раделов Ф.К. Оценка современной динамики пожаров в аридных экосистемах по материалам космической съемки (на примере Черных Земель) // Аридные экосистемы, 2010. – Т.16, №3 (43). – С.5-16
15. Weng Q., Fu P., Gao F. Generating daily land surface temperature at Landsat resolution by fusing Landsat and MODIS data //Remote Sensing of Environment. – 2014. – Т. 145. – P. 55-67.
16. Иванов В.В. Степи Западного Казахстана в связи с динамикой их покрова. – М.-Л.: АН СССР, 1958. – 228 с.
17. Анализ отечественного и зарубежного опыта управления пожарами в степях и связанных с ними экосистемах, в частности, в условиях ООПТ / Буйволов Ю.А, Быкова Е.П. и др. // URL: [http://www.biodiversity.ru/programs/steppe/docs/pozhar/fires-in-steppe\\_review21012012.pdf](http://www.biodiversity.ru/programs/steppe/docs/pozhar/fires-in-steppe_review21012012.pdf)

**Сведения об авторах:**

**Павлейчик Владимир Михайлович**, заведующий лабораторией Института степи УрО РАН,  
кандидат географических наук  
460000, г. Оренбург, ул. Пионерская, д. 11, тел.: (3532) 774432, 776247, e-mail: [pavleychik@rambler.ru](mailto:pavleychik@rambler.ru)

**Мячина Ксения Викторовна**, старший научный сотрудник Института степи УрО РАН,  
кандидат географических наук  
460000, г. Оренбург, ул. Пионерская, д. 11, тел.: (3532) 774432, 776247, e-mail: [mavicsen@list.ru](mailto:mavicsen@list.ru)