

В. М. Павлейчик¹, Р. В. Ряхов²

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПОСТПИРОГЕННОГО СОСТОЯНИЯ СТЕПНЫХ УЧАСТКОВ (НА ПРИМЕРЕ КЛЮЧЕВОЙ ТЕРРИТОРИИ В ЮЖНОМ ЗАУРАЛЬЕ)

АННОТАЦИЯ

Пирогенное воздействие является одним из наиболее значимых экологических и ландшафтообразующих факторов в степных регионах Северной Евразии, в связи с чем вопросы оценки характера и продолжительности восстановительных процессов остаются более чем актуальными. В задачи исследования входило выявление региональных особенностей применения спектральных индексов при оценке динамики восстановительных постпирогенных процессов. Ключевая территория расположена в Южном Зауралье в пределах Оренбургской области и занимает площадь 657 км². В августе 2017 г. часть ее была подвержена воздействию пожара. Исходными материалами послужили мультиспектральные снимки Landsat-8. Сбор зональной статистики производился по 26 участкам площадью 1 км² каждый, линейно сгруппированных в 6 условных профилей. С учетом представления о показателях продолжительности постпирогенных восстановительных процессов, временная серия снимков охватывает вегетационные периоды с 2016 по 2019 г. Для анализа использованы широко используемые спектральные индексы: NDVI, BAI, MIRBI, NBR, NBR2, NBRT1, NBRT3, SWVI и температура поверхности. На основе сформированной базы данных произведен расчет значений по отдельным профилям и в целом по всем площадкам с разделением на горелые и не горелые территории. Вычислены фактические (средние, максимальные и минимальные) значения и отклонения от контрольных показателей, подготовлены таблицы корреляционных зависимостей между значениями спектральных индексов. Все рассмотренные спектральные индексы с различной степенью контрастности зафиксировали особенности сгоревшей поверхности вплоть до окончания вегетационного периода 2017 г. Наибольшую продолжительность сохранения различий между гарями и естественной растительностью без существенной потери границ контура (до конца 2019 г.) показали MIRBI, NBR2 и показатели температуры поверхности. Часть спектральных индексов (NDVI, NBR, NBRT1, BAI и, особенно, SWVI) длительное время сохраняли очертания контура гари, но кардинально меняли характер соотношения с фоном в различные сроки восстановительного периода. Этому способствовало активное нарастание зеленой фитомассы на гарях и маскирующее влияние сухой фитомассы на контрольных площадках. Продолжительность сохранения отличий между гарями и контрольными участками по данным ДЗЗ составляет примерно два года (вегетационный сезон). В схожие сроки оценивается возобновление способности к устойчивому распространения огня.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: степные пожары, спутниковые изображения, спектральные индексы, восстановление

¹ Институт степи Уральского отделения РАН, ул. Пионерская, д. 11, Оренбург, Россия, 460000, e-mail: vmavleychik@gmail.com

² Институт степи Уральского отделения РАН, ул. Пионерская, д. 11, Оренбург, Россия, 460000, e-mail: remus.rv@gmail.com

Vladimir M. Pavleichik¹, Roman V. Ryahov²

SPECTRAL INDICATORS OF THE POST-PYROGENIC STATE OF STEPPE AREAS (USING THE EXAMPLE OF A KEY TERRITORY IN THE SOUTHERN TRANS-URALS)

ABSTRACT

Pyrogenic effects are one of the most significant environmental and landscape-forming factors in the steppe regions of Northern Eurasia, and therefore the issues of assessing the nature and duration of restoration processes remain more than relevant. The objectives of the study were to identify regional features of the use of spectral indices in assessing the dynamics of post-pyrogenic recovery processes. The key territory is located in the Southern Trans-Urals within the Orenburg Region and covers an area of 657 km². In August 2017, part of it was exposed to fire. The initial materials were multispectral images of Landsat-8, the collection of zonal statistics was carried out on 26 sites with an area of 1 km² each, linearly grouped into 6 conditional profiles. Taking into account the idea of the duration of post-pyrogenic recovery processes, the time series of images covers the growing season from 2016 to 2019. Widely used spectral indices were used for the analysis: NDVI, BAI, MIRBI, NBR, NBR2, NBRT1, NBRT3, SWVI and surface temperature. Based on the generated database, the values were calculated for individual profiles and for all sites in general, divided into burnt and unburnt territories. The actual (average, maximum and minimum) values and deviations from the benchmarks were calculated, tables of correlation dependencies between the values of spectral indices were prepared. All the considered spectral indices with varying degrees of contrast recorded the features of the burnt surface until the end of the growing season in 2017. MIRBI, NBR2 and surface temperature indicators showed the longest duration of preservation of differences between burning and natural vegetation without significant loss of contour boundaries (until the end of 2019). Some spectral indices (NDVI, NBR, NBRT1, BAI and, especially, SWVI) retained the outlines of the burning contour for a long time, but radically changed the nature of the relationship with the background at various times of the recovery period. This was facilitated by the active growth of green phytomass on the burns and the masking effect of dry phytomass on the control sites. The duration of the preservation of differences between burns and control areas according to remote sensing data is about two years (growing season). Approximately at the same time, the resumption of the ability to spread fire sustainably is estimated.

KEYWORDS: steppe fires, satellite images, spectral indexes, restoration

ВВЕДЕНИЕ

Отмечаемое с начала 2000-х гг. усложнение пожарных обстановок во многих степных регионах Северной Евразии сопровождалось сокращением периодов между пожарами. Учитывая тот факт, что пирогенное воздействие является одним из наиболее значимых экологических и ландшафтообразующих факторов, вопросы оценки характера и продолжительности восстановительных процессов остаются более чем актуальными. Данные дистанционного зондирования (ДЗ) и применяемые для их анализа географические информационные системы (ГИС) позволяют осуществлять многолетнее картирование и мониторинг изменений аридных геосистем и определить пространственно-временные тен-

¹ Institute of Steppe of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 11, Pionerskaya str., Orenburg, 460000, Russia, e-mail: vmavleychik@gmail.com

² Institute of Steppe of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 11, Pionerskaya str., Orenburg, 460000, Russia, e-mail: remus.rv@gmail.com

денции постпирогенного восстановления [Röder et al., 2008; Parker et al., 2015; Nizamani et al., 2023].

Применяемые в мировой практике геоинформационного дешифрирования ДДЗ методы для изучения выгоревших аридных геосистем в основном сконцентрированы на апробации и адаптации механизмов направленных на определение облесенных территорий, подвергшихся пирогенному воздействию. Наиболее эффективными способами считаются расчеты числовых индексных показателей, эффективно реагирующих на изменение состояния растительного покрова после пожара и позволяющих осуществлять статистическую обработку полученных данных [Martin, Chuvieco, 1998; Key, Benson, 1999; Trigg, Flasse, 2001; Holden et al., 2005; Key, Benson, 2006; Holden et al., 2018; Perez et al., 2021], которые базируются на дифференциации поглотительно-отражательной способности элементов подстилающей поверхности. В дополнение к ним возможно применение методов оценки вегетационных [Tucker, 1979] и влагосодержащих параметров территории [Gao, 1996]. Это позволяет осуществлять комплексную оценку антропогенного влияния на пожарный режим [Mishra et al., 2016; Mayr et al., 2018; Rasul et al., 2021; Dewald et al., 2023]. Непосредственное влияние выгорания на биопродуктивность геосистем высоко варьируется в пространственных и временных масштабах [Pandit et al., 2021]. Для этого необходимо создание геоинформационных моделей, включающих многолетнюю информацию, полученную при дешифрировании ДДЗ. Итоговым результатом многолетней оценки выгорания геосистем может стать картографическое прогнозирование процессов, связанное с выделением потенциально пожароопасных территорий [Sukhinin et al., 2004; Lozano et al., 2007; Weber et al., 2008; Hardtke et al., 2015].

Использование спектральных индексов для идентификации ареалов пожаров в различных регионах России и для изучения их динамики нашлось во многочисленных публикациях, среди которых [Украинский, 2013; Медведева и др., 2020; Шинкаренко, 2021].

В проведенном исследовании предлагается анализ особенностей отображения особого постпирогенного состояния степных ландшафтов различными спектральными индексами и оценка продолжительности существования различий между сгоревшими и контрольными участками.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве ключевой выбрана территория площадью 657 км², расположенная в Южном Зауралье в пределах Оренбургской обл., охватывающая полого-увалистые равнинные пространства междуречья рек Большой Кумак и Орь (левобережные притоки р. Урал) (рис. 1). Основу современных ландшафтов большей части территории составляет зауральский пенеппен, представляющий собой обширно распространенную кору выветривания мезозойского возраста с преобладанием засоленных глинистых отложений. Типичные степи здесь представлены преимущественно ковыльно-типчачковыми и тырсовыми сообществами, часто чередующимися с галофитно-степными комплексами (профили 1–4, рис. 1). Лишь в северной части территории поверхность занята более молодыми песчаными отложениями, распространенными в долине р. Бол. Кумак. Эти хорошо дренируемые отложения заняты высокопродуктивными псаммофитными степями (профили 5–6, рис. 1). Пестрота ландшафтной структуры в сочетании с засоленностью почвенного профиля определили использование территории преимущественно в качестве пастбищных угодий.

Анализируемое пространство гари состоит из отдельных участков, подвергшихся воздействию огня в различные сроки — 9, 20 и 28–31 августа 2017 г. Определение дат пожаров производилось на основе ежедневных спутниковых изображений MODIS¹.

¹ Worldview. NASA. Электронный ресурс: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/> (дата обращения 01.03.2023)

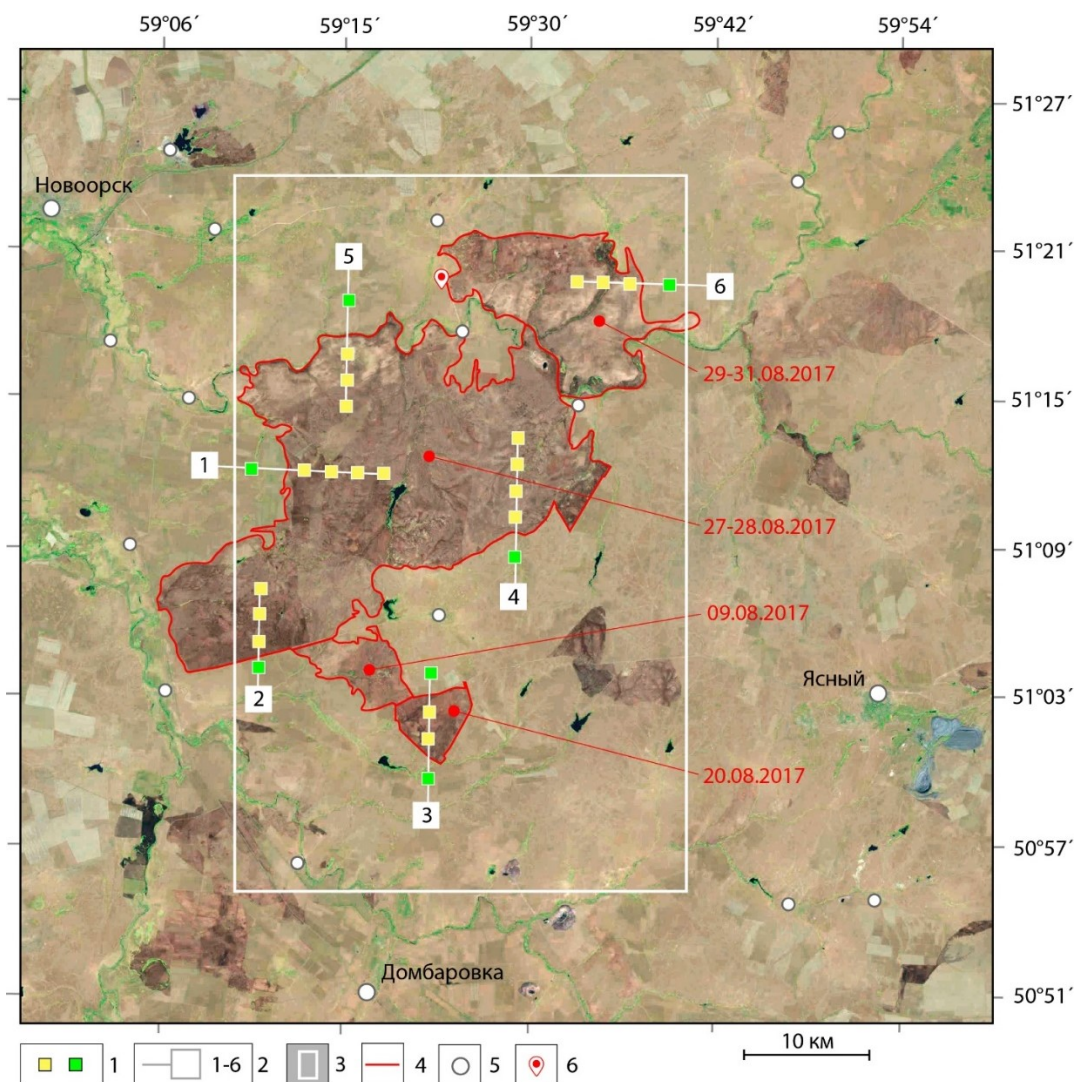


Рис. 1. Схема размещения полигонов для сбора статистической информации. Основа — снимок Landsat-8 (LC08_L1TP_163024_20170920_20200903_02_T1). Условные обозначения: 1 — полигоны (желтые — в пределах гары, зеленые — фоновые); 2 — линии и номера условных профилей; 3 — фрагмент сцены, приводимый на схемах распределения значений спектральных индексов (рис. 2); 4 — границы гарей 2017 г., даты пожаров; 5 — населенные пункты; 6 — место фотофиксации постпирогенного состояния участка песчаной степи (рис. 2)

Fig. 1. The layout of polygons for collecting statistical information.

The basis is the Landsat-8 snapshot (LC08_L1TP_163024_20170920_20200903_02_T1). Symbols: 1 — polygons (yellow — within the burning, green — background); 2 — lines and numbers of conditional profiles; 3 — a fragment of the scene shown in the diagrams of the distribution of spectral index values (Fig. 2); 4 — the boundaries of the harem in 2017, the dates of the fires; 5 — settlements; 6 — the place of photofixation of the post-pyrogenic state of the sandy steppe area (Fig. 2)

С учетом представления о показателях продолжительности постпирогенных восстановительных процессов, полученных ранее дистанционными и натурными исследованиями [Мячина и др., 2016; Павлейчик, Мячина, 2016; Павлейчик и др., 2020], нами выбраны два временных отрезка за период с 2016 по 2019 г. Первый период охватывает теплый сезон 2016 и 2017 гг., до времени распространения пожаров. Анализ этого периода был

необходим для обоснования расположения репрезентативных площадок и профилей, не подверженных (по крайней мере, за рассматриваемых 2 года) воздействию пожаров. Послепожарный период охватывает часть вегетационного периода 2017 г. и полностью теплые сезоны 2018 и 2019 гг.; в совокупности за это время рассмотрено и проанализировано 11 разновременных сцен спутниковых изображений.

Сбор зональной статистики производился по 26 участкам площадью 1 км² каждый, линейно сгруппированных в 6 условных профилей (рис. 1). Из общего числа площадок 19 расположены в пределах ареала выгорания, а 7 контрольных участков находились за ее пределами. Контрольные участки выбирались из принципов непосредственной близости к исследуемым полигонам, ландшафтной однородности профиля и с условием неподверженности выгоранию в исследуемый период.

Исходными материалами послужили мультиспектральные снимки спутников серии Landsat-8, доступные на ресурсах Геологической службы США (USGS)¹. Анализ снимков проводился при помощи ArcGIS 10.2. и QGIS 3.22.11. В целях повышения качества дешифрирования пространственных данных безразмерные значения яркостных характеристик спутниковых снимков преобразованы в значения отражающей способности поверхности (альбедо). Повышение объективности моделирования достигалось расчетом поверхностной температуры (°C) по спутниковым термическим сенсорам.

В анализе динамики восстановительных постпирогенных процессов задействованы широко используемые спектральные индексы:

- вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [Tucker, 1979];
- индекс зоны выгорания (BAI, Burned Area Index), использующий значения коэффициента отражения в красной (RED) и ближней инфракрасной (NIR) части спектра для определения областей местности, затронутых пожаром [Martin, Chuvieco, 1998];
- средний инфракрасный ожоговый индекс (MIRBI, Mid-Infrared Burn Index), состоящий из коротковолнового инфракрасного (SWIR1) и длинного среднего (SWIR2) инфракрасного спектров; может достаточно точно различать обгоревшие и негоревшие области [Trigg, Flasse, 2001];
- нормализованный коэффициент выгорания (NBR, Normalized Burn Ratio), один из наиболее применяемых показателей для оценки тяжести выгорания, рассчитывается как соотношение между значениями NIR и SWIR2 [Key, Benson, 1999];
- модификация нормализованного коэффициента выгорания (NBR2); изменяет NBR, чтобы подчеркнуть чувствительность растительности к воде, и может быть полезен в исследованиях восстановления после пожара [Key, Benson, 2006];
- нормализованный термический коэффициент выгорания (NBRT1, Normalized Burn Ratio Thermal) и его модификация (NBRT3). Используют тепловую полосу для улучшения NBR, что приводит к лучшему разделению сгоревшей и несгоревшей земли [Holden et al., 2005; Holden et al., 2018; Perez et al., 2022];
- спектральный коротковолновый вегетационный индекс (SWVI, Short Wave Vegetation Index/NDWI, Normalized Difference Water Index); наиболее чувствителен к содержанию влаги в растительном покрове, что обеспечивает возможность его эффективного использования для мониторинга стресса и повреждения растительности [Gao, 1996].

Помимо перечисленных индексов, рассчитаны и сопоставлены значения температуры подстилающей поверхности (°C).

¹ Earth Explorer Landsat. United States Geological Survey (USGS). Электронный ресурс: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения 01.03.2023)

Особенности пространственно-временного распределения индексов выявлялись на основе серий разновременных картосхем. На основе выборки средних значений по участкам 1x1 км, далее объединяемых по отдельным профилям и в целом по всем площадкам, подготовлена достаточно обширная база данных. К расчету приняты как фактические (средние, максимальные и минимальные) значения, так и отклонения от контрольных показателей. Подготовлены таблицы корреляционных зависимостей между значениями спектральных индексов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Общеизвестно, что характерным признаком растительного покрова и его состояния является спектральная отражательная способность, характеризующая большими различиями в отражении излучения разных длин волн. Важнейшими факторами отражательных свойств растительности (особенно для территорий с травянистыми биомами) являются:

- оптические свойства зеленых листьев;
- геометрия надземных частей растений (особенно индекс листовой поверхности) и угловое распределение листьев;
- отражательная способность поверхности почвы;
- пространственная структура растительного покрова.

Для понимания фактической картины послепожарного состояния растительного покрова приведем снимки (стандартные RGB изображения) фрагмента песчаных степей на территории исследования (рис. 2).

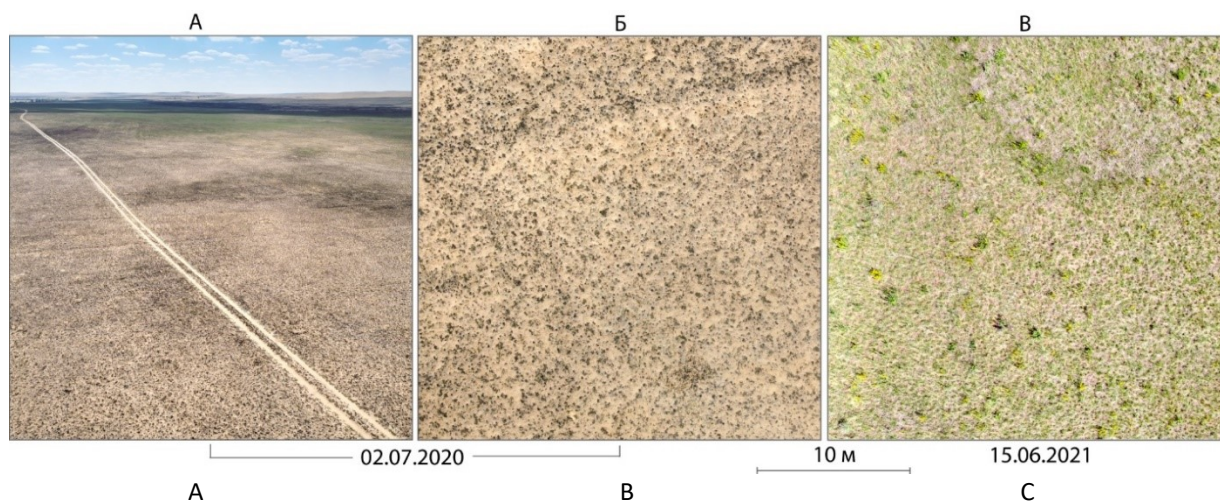


Рис. 2. Пример постпирогенного состояния участка песчаных степей после пожара 06.06.2020 г. А и Б — общий вид гари и фрагмент по состоянию на 02.07.2020 г., В — состояние на 15.06.2021 г.

Fig. 2. An example of the post-pyrogenic state of a sandy steppe site after a fire on 06.06.2020. A and B are the general view of the burning and the fragment as of 07.02.2020, C is the state as of 06.15.2021

Из приведенных изображений заметно, что непосредственно после пожара темный фон гари определяется преимущественно характером пространственного распределения сгоревших дернин злаков (ковыля и др.) и степных кустарников. В свою очередь, разнообразие растительного покрова (видовая структура, плотность покрова, количество фитомас-

сы и др.) даже на относительно однородных элементах ландшафта заметно дифференцировано, прежде всего исходя из условий перераспределения питательных веществ и почвенной влаги в пониженные формы рельефа. Прохождение пожара в сезонный пик вегетации степной растительности (06 июня 2020 г.) спустя почти месяц (2 июля 2020 г.) обусловило активное нарастание зеленой фитомассы на более увлажненных участках (рис. 2а, дальний план фотографии), тогда как на повышенных участках возобновление вегетации носило гораздо менее выраженный характер на фоне засушливых и жарких метеоусловий. В следующем после пожара году обычно наблюдается активное возобновление вегетации всех основных групп растений, что и отмечено 15 июня 2021 г. на том же участке (рис. 2в, аспект цветущего подмаренника русского).

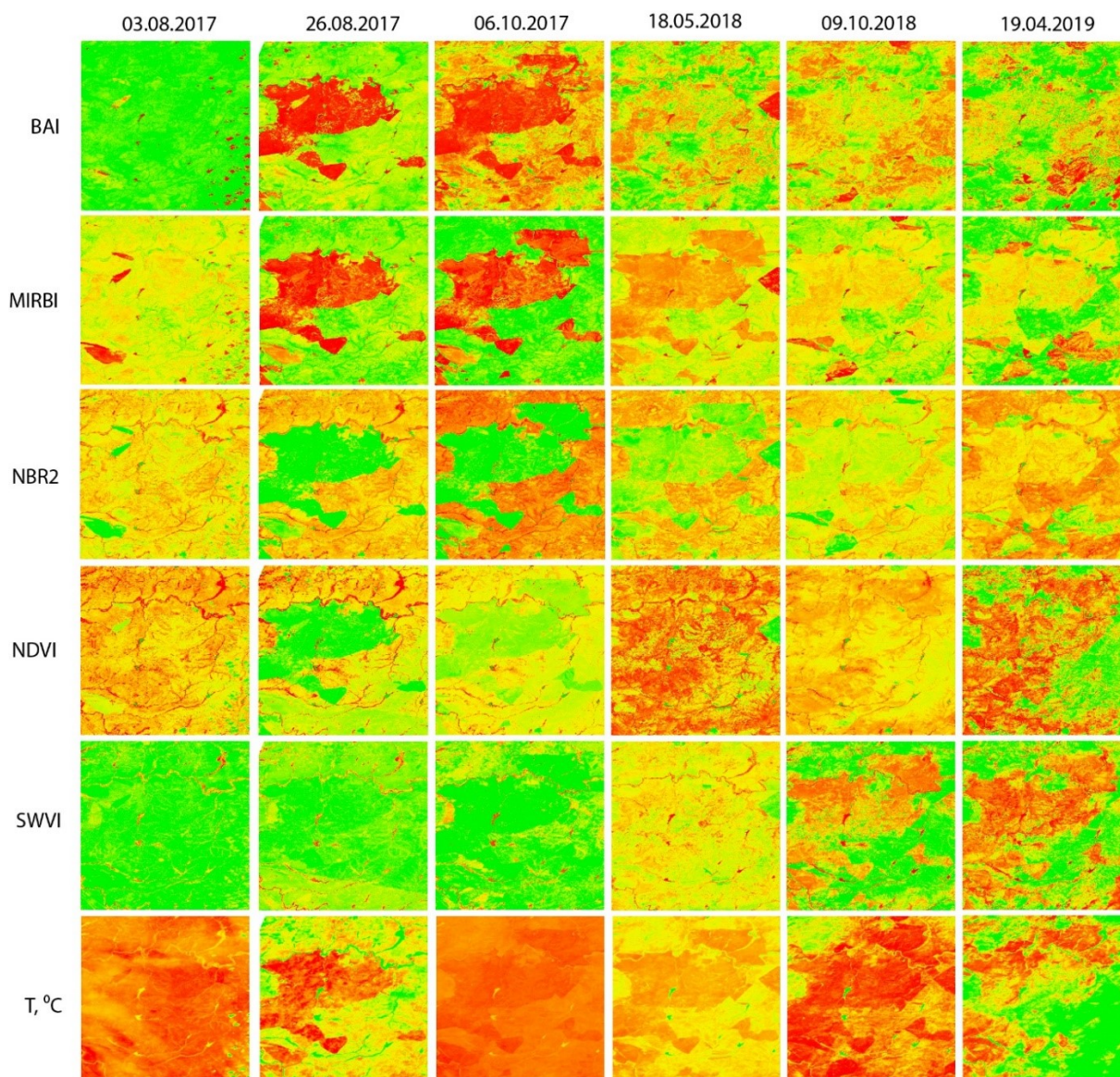


Рис. 3. Схемы распределения значений некоторых спектральных индексов в предпожарном (03.08.2017) и постпожарных состояниях
Fig. 3. Schemes of distribution of values of some spectral indices in the pre-fire (08.03.2017) and post-fire states

Сходная ситуация отмечается и после пожара 2017 г. На рисунке 3 показана часть из проанализированных снимков; предпожарное состояние представлено одной датой (03 августа 2017 г.), максимально приближенной к событию пожара, а смена постпожарных состояний ограничена весенними и осенними месяцами.

Все рассматриваемые спектральные индексы имеют ярко выраженную дифференциацию показателей в промежутке от выгорания до начала нового теплого периода, что связано со слабой вегетационной активностью степной растительности в позднелетнее и осеннее времена года (рис. 3, снимки за 26.08.2017 и 06.10.2017). Характерной также является внутригодовая (сезонная) динамика показателей, связанная с особенностями вегетации на фоне проявления восстановительных процессов в растительности. Наименьшие годовые отличия между сгоревшей территорией и контрольными участками наблюдаются в период активной вегетации.

Характеризуя динамику индекса MIRBI (рис. 3, 4), можно утверждать, что геосистемы ключевых участков на протяжении 2016 г. имели сходные природно-климатические параметры, что подтверждается высокой степенью близости значений исследуемого показателя.

В 2017 г. происходит резкая дифференциация выгоревших территорий от контрольных участков. Разновременной характер повышения значений индекса на выгоревших участках может свидетельствовать о неравномерности выгорания территории в течение вегетационного сезона. При этом их общая тенденция в высокой степени сопоставима — амплитуда значений $\pm 0,25$ ед. Весной 2018 г. еще прослеживается разница в показателях с общим трендом на их выравнивание, что наблюдается к осени данного года. На более длительных периодах дифференциация значений значительно затруднена, и использование данного показателя не является рациональным. Динамика индекса NBR носит более неравномерный характер, при этом основные тенденции являются сопоставимыми. Аналогично индексу MIRBI, данный показатель отличается относительной близостью значений до периода выгорания с последующей резкой и существенной дифференциацией и выравниванием ко второй половине 2018 г. Последующие периоды также малоинформативны для анализа сукцессионных процессов.

Индекс NBR2 (рис. 3, 4), являясь прямой модификацией индекса NBR, имеет крайне схожую динамику, обладая при этом меньшей зашумленностью показателей. Имеет высокую степень корреляции (прямой либо обратной) с индексами MIRBI, NBR и NDVI. Применение данного индекса, вероятно, более обосновано, нежели его первой версии.

Индекс BAI (рис. 3, 4) — наиболее многообещающий показатель в определении как постпирогенной, так и допирогенной динамики. Он отличается крайне чувствительной реакцией на пожароопасную обстановку. Низкие значения показателя говорят о низкой степени угрозы пожара, что подтверждается показателями на выгоревших участках в 2018 г., т. к. на данных территориях отсутствовали отмершие растительные остатки, являющиеся главной движущей силой в распространении огня через степные геосистемы.

Вегетационный индекс NDVI (рис. 3, 5), как наиболее универсальный показатель, отображает постпирогенную динамику на уровне вышеупомянутых индексов. Он позволяет проследить основные моменты, происходящие в геосистеме, такие как фоновые значения до выгорания территории, экстремумы показателей непосредственно в сезон прохождения пожара и постпирогенную динамику территории. В отличие от индексов пожарной опасности, NDVI также предоставляет понимание объемов относительной биомассы на исследуемых участках.

Индекс увлажненности территории SWVI (рис. 3, 5) — единственный демонстрирующий устойчивую дифференциацию выгоревших и сохранившихся территорий на протяжении всего последующего вегетационного периода. Особенностью индекса является то,

что непосредственно после пожара он определяет территорию опытных участков как более сухую по сравнению с фоновыми значениями. При этом сезоны 2018–2019 гг. отличаются большим коэффициентом увлажнения на опытных участках, нежели фоновые значения, полученные с контрольных. В то же время основной тренд индекса аналогично направлен на нивелирование разницы в амплитуде значений.

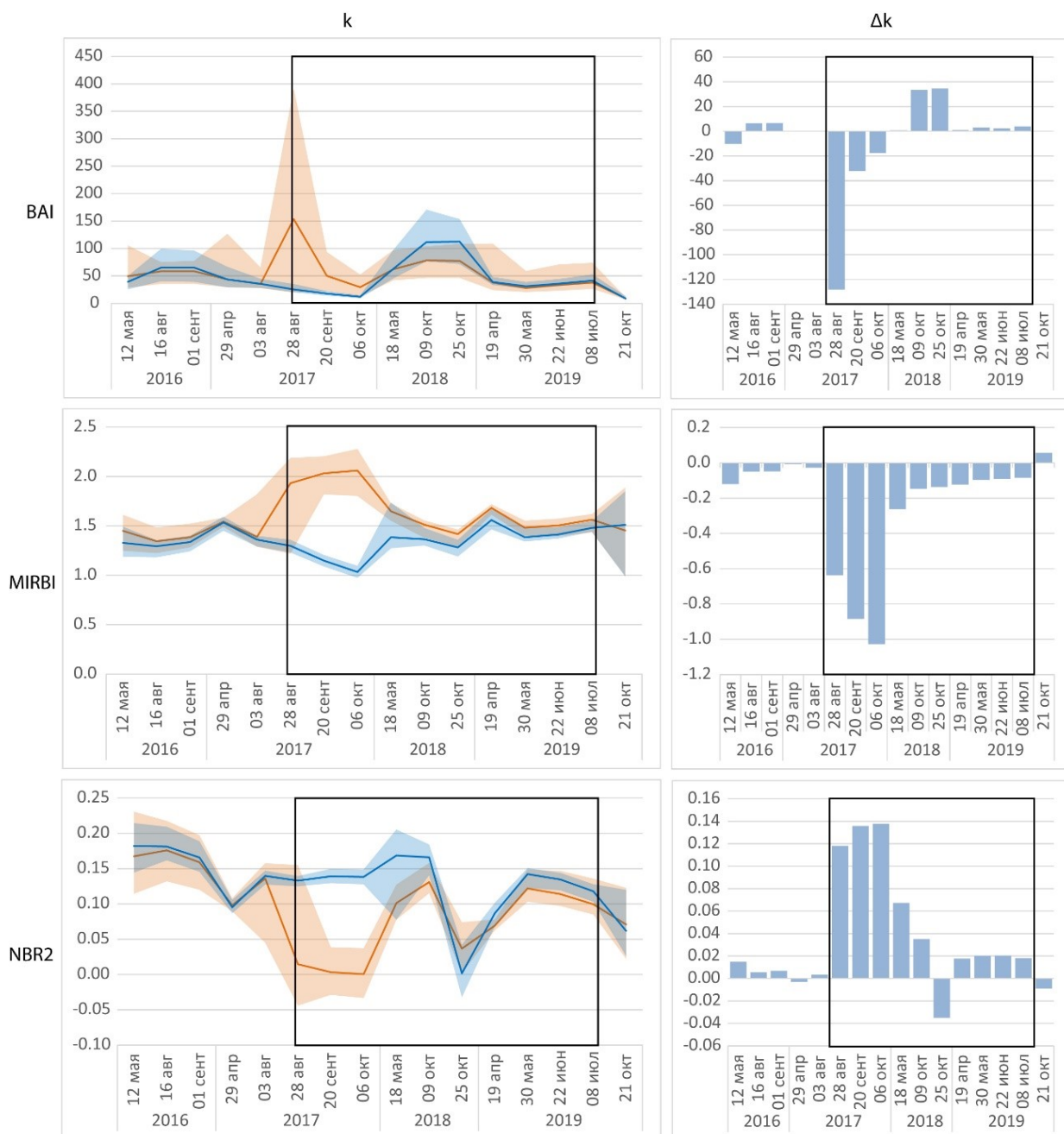


Рис. 4. Распределение средних значений, амплитуда между максимальными и минимальными значениями спектральных индексов BAI, MIRBI и NBR2 (k). Отклонения значений (Δk) — разность между средними значениями по контрольным площадкам и гарями

Fig. 4. Distribution of average values, amplitude between maximum and minimum values of spectral indices BAI, MIRBI and NBR2 (k). Deviations of values (Δk) — the difference between the average values for control sites and burns

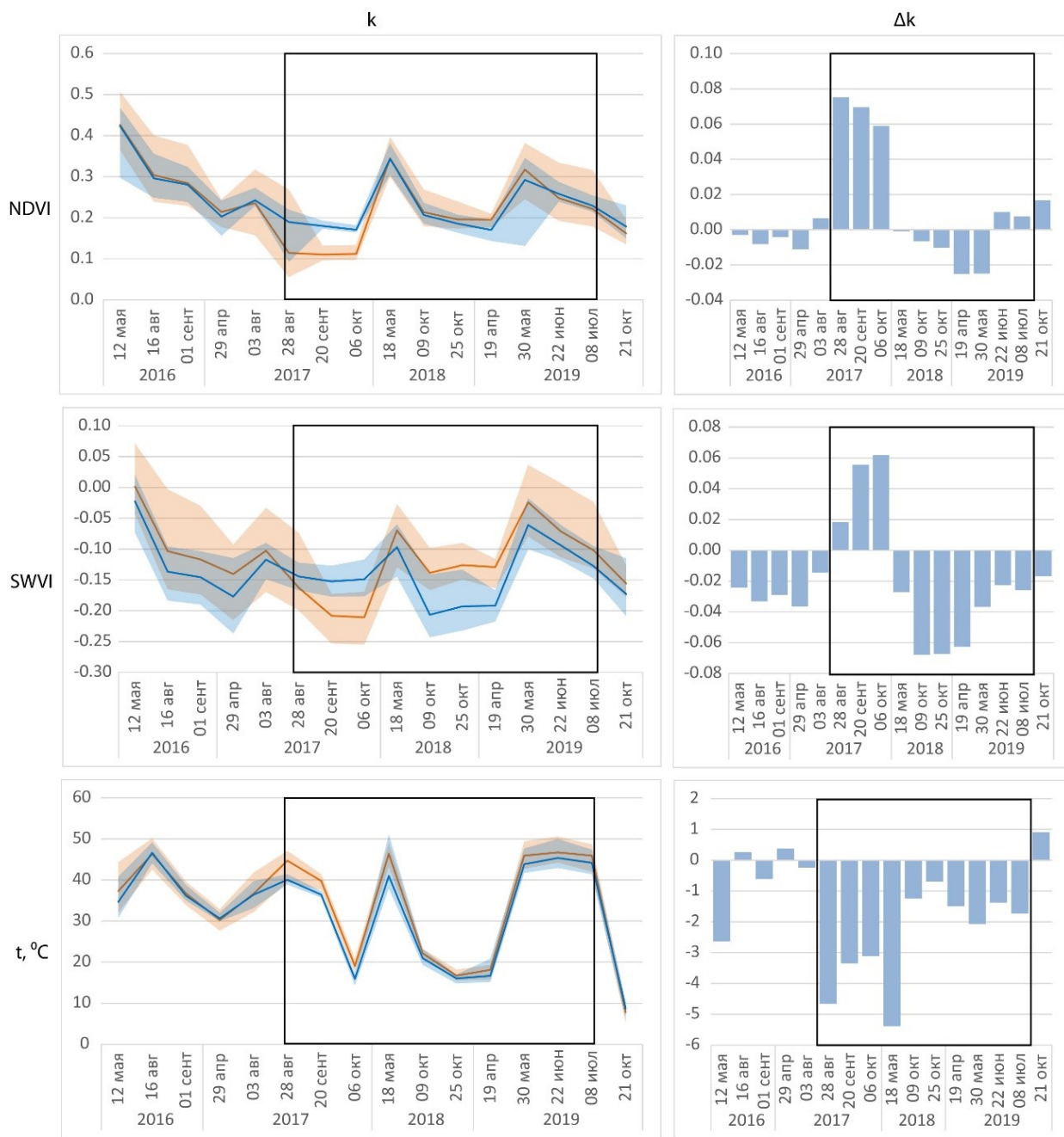


Рис. 5. Распределение средних значений, амплитуда между максимальными и минимальными значениями спектральных индексов NDVI, SWVI и температуры поверхности (k). Отклонения значений (Δk) — разность между средними значениями по контрольным площадкам и гарям

Fig. 5. Distribution of average values, amplitude between maximum and minimum values of spectral indices NDVI, SWVI and surface temperature (k). Deviations of values (Δk) — the difference between the average values for control sites and burns

Значения поверхностной температуры (рис. 3, 5) на выгоревших участках отличаются незначительным (первые градусы) повышением значений по сравнению с контрольными. На первый взгляд, данный показатель может показаться малоинформативным для оценки постпирогенной динамики. Но, в отличие от большинства рассмотренных спектральных индексов, график разности температур поверхности контрольных площадок и гари

имеет наиболее закономерный ход на протяжении всего восстановительного периода, вплоть до конца 2019 г. Характерно, что на постепенное сокращение различий накладываются особенности температурного режима сезонов года с максимумами различий в промежутке май–июнь, т. е. в период максимальной вегетации степной растительности.

Индексы, содержащие в себе термальный коэффициент (NBRT1 и NBRT3), по причине крайней близости значений трудно анализируемы и не дают представления о постпирогенной динамике геосистем. Характерной особенностью первого из них является то, что он имеет околонулевую корреляционную зависимость с показателем температуры подстилающей поверхности.

Отдельное внимание необходимо уделять способам систематизации и обработки данных, не допуская необоснованного обобщения информации. Так, приводимые выше графики обобщают данные с 6 профилей, каждый из которых отличался специфичным распределением значений во времени, исходя из особенностей их расположения в ландшафтах территории. Для рассматриваемой территории наиболее активное восстановление отмечено для песчаных степей в долине р. Большой Кумак (профили 5 и 6 на рис. 1).

Статистическая взаимосвязь между временными рядами значений индексов представлена на рис. 6, отдельно по контрольным площадкам и по сгоревшей территории. Заметно, что теснота корреляционных зависимостей по горелой территории выше, чем на контрольных площадках.

А - контроль

	MIRBI	NBR	NBR2	NBRT1	NBRT3	NDVI	SWVI	BAI	t
MIRBI	x	-0.12	-0.07	-0.07	-0.56	0.35	0.09	0.24	0.26
NBR		x	0.28	0.22	-0.55	0.81	0.84	-0.07	0.64
NBR2			x	-0.30	-0.26	0.44	0.43	-0.37	0.47
NBRT1				x	0.35	0.23	-0.30	0.88	-0.37
NBRT3					x	-0.65	-0.77	0.26	-0.92
NDVI						x	0.77	0.06	0.65
SWVI							x	-0.50	0.81
BAI								x	-0.39
t									x

Б - гарь

	MIRBI	NBR	NBR2	NBRT1	NBRT3	NDVI	SWVI	BAI	t
MIRBI	x	-0.95	-0.80	-0.73	0.37	-0.72	-0.79	0.18	-0.03
NBR		x	0.84	0.62	-0.51	0.88	0.93	-0.22	0.23
NBR2			x	0.39	-0.49	0.83	0.82	-0.30	0.30
NBRT1				x	0.20	0.43	0.33	0.12	-0.39
NBRT3					x	-0.49	-0.70	-0.12	-0.83
NDVI						x	0.92	-0.33	0.39
SWVI							x	-0.26	0.47
BAI								x	0.06
t									x

Рис. 6. Корреляционные зависимости между значениями спектральных индексов за восстановительный период (28.08.2017–08.07.2019). Цветовым градиентом (от синего к красному) показано нарастание тесноты связей, независимо от его знака

Fig. 6. Correlations between the values of spectral indices for the recovery period (08.28.2017–07.08.2019). The color gradient (from blue to red) shows an increase in the closeness of connections, regardless of its sign

Наиболее существенные отличия в обоих случаях (контроль и гарь) от остальных показал индекс NBRT1 — нормализованный термический коэффициент выгорания. Низкая зависимость других показателей определялась состоянием площадок. Для участков с естественной растительностью (контроль) таковым стал NBR2, а для ареала гари — BAI и температура поверхности.

При сопоставлении информации с площадок (гарь-контроль) также следует учитывать неопределенное влияние сухой фитомассы, маскирующей обилие зеленой растительности. Это влияние на контрольных участках проявляется на протяжении всего периода с учетом сезонной ритмики (либо ситуационного проявления) деструкционных процессов, на ареале гари — постоянно нарастающее по мере вегетации и последующего перехода в сухое состояние. Дополнительно необходимо отметить, что участки зональных типичных степей, песчаных и галофитных вариантов (к каковым и относится территория исследования) характеризуются невысоким проективным покрытием растительности. Это может послужить фактором повышения погрешности в измерениях индексов гарей и вегетационных индексов.

ВЫВОДЫ

К основным качествам спектральных индексов, важным для решения поставленных задач, можно отнести:

- способность достоверно зафиксировать необходимые качества поверхности за счет контрастности по отношению к фоновым поверхностям;
- сохранение способности к дифференцированной оценке ареала гари, стабильность значений и отсутствие реакции на вторичные факторы.

Все рассмотренные спектральные индексы с различной степенью контрастности зафиксировали особенности сгоревшей поверхности вплоть до окончания вегетационного периода 2017 г. Таким образом, их использование для идентификации площадей пожаров достаточно объективно. Невысокие различия по отношению к фону показали лишь SWVI и NBR на первом послепожарном снимке, но на двух последующих снимках в осенние месяцы оба индекса нарастили различия.

Наибольшую продолжительность сохранения различий между гарями и естественной растительностью без существенной потери границ контура показали MIRBI и NBR2. Сохранение пространственного единства контура гари отмечалось по температуре поверхности до сентября 2018 г. Очень своеобразным было поведение SWVI, в целом сохранившим очертания контура гари, но кардинально поменявшим характер соотношения с фоном в осенние месяцы 2018 г. и в апреле 2019 г. Схожая ситуация наблюдалась у NBRT3 (особенно в сентябре–октябре 2017 г.) и у ряда других индексов, хотя менее выражено и в разные сроки восстановительного периода — NDVI, NBR, NBRT1, BAI.

Заметим, что полученные результаты относятся исключительно к конкретному сочетанию гидротермических условий рассматриваемого периода, дат пожаров и разреженного характера растительного покрова участка. Результаты отражают неоднозначность использования спектральных индексов для оценки значимости пирогенных воздействий и продолжительности восстановительных постпирогенных процессов в степных ландшафтах. Важно понимать, что отражательная способность поверхности зависит от множества факторов, связанных с пространственной и видовой структурой степной растительности, особенностями сезонной вегетации на контрольных и горелых площадках, неопределенной роли сухой фитомассы при определении значений спектральных индексов и др. Таким образом, на настоящее время отсутствуют универсальные показатели, способные однозначно отражать последовательность восстановительных процессов. Это обусловлено как

самим подходом (использование материалов ДЗЗ), так и определенной «специализацией» индексов. Исключением являются показатели температуры поверхности, относительно объективно оценивающие особенности термического режима.

В любом случае продолжительность сохранения отличий между гарями и контрольными участками по данным ДЗЗ составляет не более 2 лет (вегетационных сезона). Этот период не обозначает полного восстановления растительного покрова до естественного, но возобновление способности к устойчивому распространению огня происходит еще быстрее. Так, часть рассматриваемого контура гари 2017 г. подвергалась пожарам в августе–октябре 2015 г. и в октябре 2019 г. Добавим, что ареал гари 2017 г. на изображениях в «натуральных цветах» неоднороден, на них фиксируется менее темный тон на участках, подвергшихся пожарам в 2015 г. Таким образом, отличия в общих запасах фитомассы (зеленой и сухой) сохраняются на более длительное время.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 23-27-00134 «Природные пожары в степных регионах Евразии как индикатор природных и социально-экономических изменений».

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was supported by the grant of the Russian National Science Foundation No. 23-27-00134 “Wildfires in the steppe regions of Eurasia as an indicator of natural and socio-economic changes”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Медведева М. А., Макаров Д. А., Сурин А. А. Применимость различных спектральных индексов на основе спутниковых данных для оценки площадей торфяных пожаров. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2020. Т. 17. № 5. С. 157–166. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-157-166.

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.

Павлейчик В. М., Калмыкова О. Г., Сорока О. В. Особенности теплового режима и условий увлажнения постпирогенных степных ландшафтов. Известия РАН. Серия географическая, 2020. Т. 84. № 4. С. 541–550. DOI: 10.31857/S2587556620040111.

Павлейчик В. М., Мячина К. В. Особенности термического режима земной поверхности после степных пожаров по данным спутников Landsat. Вестник ОГУ, 2016. № 4(192). С. 83–89.

Украинский П. А. Динамика спектральных свойств зарастающих травяных гарей. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2013. Т. 10. № 4. С. 229–238.

Шинкаренко С. С. Изменение спектрально-отражательных характеристик зональных ландшафтов Северного Прикаспия при пирогенном воздействии. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2021. Т. 18. № 3. С. 192–206. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-192-206.

Dewald J., Southworth J., Moise I. The role of people, parks and precipitation on the frequency and timing of fires in a sub-Saharan savanna ecosystem. International Journal of Wildland Fire, 2023. V. 33. DOI: 10.1071/WF23020.

- Gao B.* NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid from space. *Remote Sensing of Environment*, 1996. V. 58. P. 257–266.
- Hardtke L. A., Blanco P. D., Del Valle H. F., Metternicht G. I., Sione W. F.* Semi-automated mapping of burned areas in semi-arid ecosystems using MODIS time-series imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015. V. 38. P. 25–35. DOI: 10.1016/j.jag.2014.11.011.
- Holden A., Smith S., Morgan P., Rollins G., Gessler E.* Evaluation of novel thermally enhanced spectral indices for mapping fire perimeters and comparisons with fire atlas data. *International Journal of Remote Sensing*, 2005. V. 26. No. 21. P. 4801–4808.
- Holden Z., Swanson A., Luce C., Matt Jolly W., Maneta M., Oyler J., Warren D., Parsons R., Affleck D.* Decreasing fire season precipitation increased recent western US forest wildfire activity. *PNAS*, 2018. V. 115. No. 36. P. E8349.
- Key C., Benson N.* Measuring and remote sensing of burn severity. USA, Idaho: Proceedings Joint Fire Science Conference and Workshop, 1999. V. II.
- Key C. H., Benson N. C.* Landscape assessment (LA) sampling and analysis methods. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164. USA, Ogden (Utah): USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2006.
- Lozano F. J., Suarez-Seoane S., De Luis E.* Assessment of several spectral indices derived from multi-temporal Landsat data for fire occurrence probability modelling. *Remote Sensing of Environment*, 2007. V. 107. No. 4. P. 533–544. DOI: 10.1016/j.rse.2006.10.001.
- Martin M. P., Chuvieco E.* Cartografía de grandes incendios forestales en la península ibérica a partir de imágenes NOAA-AVHRR. Mapping of large forest fires in the Iberian Peninsula from NOAA-AVHRR images. Serie: Geografica, 1998. V. 7. P. 109–128.
- Mayr M., Vanselow K., Samimi C.* Fire regimes at the arid fringe: A 16-year remote sensing perspective (2000–2016) on the controls of fire activity in Namibia from spatial predictive models. *Ecological Indicators*, 2018. V. 91. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.04.022.
- Mishra N., Mainali K., Crews K.* Modeling spatio-temporal variability in fires in semi-arid savannas: A satellite-based assessment around Africa's largest protected area. *International Journal of Wildland Fire*, 2016. V. 25. DOI: 10.1071/WF15152.
- Nizamani M., Zhang Q., Muhae-Ud-Din G., Awais M., Qayyum M., Farhan M., Jabran M., Wang Y.* Application of GIS and remote-sensing technology in ecosystem services and biodiversity conservation, 2023. P. 38. DOI: 10.1201/9781032646268-12.
- Pandit K., Dashti H., Hudak A., Glenn N., Flores A., Shinneman D.* Understanding the effect of fire on vegetation composition and gross primary production in a semi-arid shrubland ecosystem using the Ecosystem Demography (EDv2.2) model. *Biogeosciences*, 2021. V. 18. P. 2027–2045. DOI: 10.5194/bg-18-2027-2021.
- Parker B. M., Lewis T., Srivastava S. K.* Estimation and evaluation of multi-decadal fire severity patterns using Landsat sensors. *Remote Sensing of Environment*, 2015. V. 170. P. 340–349.
- Perez C. C., Olthoff A. E., Hernandez-Trejo H., Rullan-Silva C. D.* Evaluating the best spectral indices for burned areas in the tropical Pantanos de Centla Biosphere Reserve, Southeastern Mexico. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2022. V. 25. P. 100664. DOI: 10.1016/j.rsase.2021.100664.
- Rasul A., Faqe I., Hameed H., Tansey K.* A trend of increasing burned areas in Iraq from 2001 to 2019. *Environment Development and Sustainability*, 2021. P. 1–19. DOI: 10.1007/s10668-020-00842-7.

Röder A., Hill J., Duguay B., Alloza J. A., Vallejo R. Using long time series of Landsat data to monitor fire events and post-fire dynamics and identify driving factors. A case study in the Ayora Region (eastern Spain). *Remote Sensing of Environment*, 2008. V. 112. No. 1. P. 259–273.

Sukhinin A. I., French N., Kasischke E., Hewson J., Soja A. J., Csiszar I. A., Hyer E. J., Loboda T., Conrad S. G., Romasko V. I., Pavlichenko E. A., Miskiv S. I., Slinkina O. A. AVHRR-based mapping of fires in Russia: New products for fire management and carbon cycle studies. *Remote Sensing of Environment*, 2004. V. 93. Iss. 4. P. 546–564. DOI: 10.1016/j.rse.2004.08.011.

Trigg S., Flasse S. An evaluation of different bi-spectral spaces for discriminating burned shrub-savannah. *International Journal of Remote Sensing*, 2001. V. 22. P. 2641–2647.

Tucker C. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 1979. V. 8. P. 127–150.

Weber K. T., Seefeldt S. S., Norton J. M., Finley C. Fire severity modeling of sagebrush-steppe rangelands in Southeastern Idaho. *GIScience & Remote Sensing*, 2008. V. 45. No. 1. P. 68–82.

REFERENCES

Dewald J., Southworth J., Moise I. The role of people, parks and precipitation on the frequency and timing of fires in a sub-Saharan savanna ecosystem. *International Journal of Wildland Fire*, 2023. V. 33. DOI: 10.1071/WF23020.

Gao B. NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid from space. *Remote Sensing of Environment*, 1996. V. 58. P. 257–266.

Hardtke L. A., Blanco P. D., Del Valle H. F., Metternicht G. I., Sione W. F. Semi-automated mapping of burned areas in semi-arid ecosystems using MODIS time-series imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015. V. 38. P. 25–35. DOI: 10.1016/j.jag.2014.11.011.

Holden A., Smith S., Morgan P., Rollins G., Gessler E. Evaluation of novel thermally enhanced spectral indices for mapping fire perimeters and comparisons with fire atlas data. *International Journal of Remote Sensing*, 2005. V. 26. No. 21. P. 4801–4808.

Holden Z., Swanson A., Luce C., Matt Jolly W., Maneta M., Oyler J., Warren D., Parsons R., Affleck D. Decreasing fire season precipitation increased recent western US forest wildfire activity. *PNAS*, 2018. V. 115. No. 36. P. E8349.

Key C., Benson N. Measuring and remote sensing of burn severity. USA, Idaho: Proceedings Joint Fire Science Conference and Workshop, 1999. V. II.

Key C. H., Benson N. C. Landscape assessment (LA) sampling and analysis methods. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164. USA, Ogden (Utah): USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2006.

Lozano F. J., Suarez-Seoane S., de Luis E. Assessment of several spectral indices derived from multi-temporal Landsat data for fire occurrence probability modelling. *Remote Sensing of Environment*, 2007. V. 107. No. 4. P. 533–544. DOI: 10.1016/j.rse.2006.10.001.

Martin M. P., Chuvieco E. Cartografía de grandes incendios forestales en la península ibérica a partir de imágenes NOAA-AVHRR. Mapping of large forest fires in the Iberian Peninsula from NOAA-AVHRR images. Serie: Geografica, 1998. V. 7. P. 109–128.

- Mayr M., Vanselow K., Samimi C.* Fire regimes at the arid fringe: A 16-year remote sensing perspective (2000–2016) on the controls of fire activity in Namibia from spatial predictive models. *Ecological Indicators*, 2018. V. 91. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.04.022.
- Medvedeva M. A., Makarov D. A., Sirin A. A.* Applicability of various spectral indices based on satellite data for estimating peat fire areas. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 2020. V. 17. No. 5. P. 157–166 (in Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-157-166.
- Mishra N., Mainali K., Crews K.* Modeling spatio-temporal variability in fires in semi-arid savannas: A satellite-based assessment around Africa's largest protected area. *International Journal of Wildland Fire*, 2016. V. 25. DOI: 10.1071/WF15152.
- Myachina K. V., Pavleychik V. M., Chibilev A. A.* Problems and possibilities of geoinformation methods in identifying steppe harems. *Regional Environmental Issues*, 2016. No. 6. P. 159–166. (in Russian).
- Nizamani M., Zhang Q., Muhae-Ud-Din G., Awais M., Qayyum M., Farhan M., Jabran M., Wang Y.* Application of GIS and remote-sensing technology in ecosystem services and biodiversity conservation, 2023. P. 38. DOI: 10.1201/9781032646268-12.
- Pandit K., Dashti H., Hudak A., Glenn N., Flores A., Shinneman D.* Understanding the effect of fire on vegetation composition and gross primary production in a semi-arid shrubland ecosystem using the Ecosystem Demography (EDv2.2) model. *Biogeosciences*, 2021. V. 18. P. 2027–2045. DOI: 10.5194/bg-18-2027-2021.
- Parker B. M., Lewis T., Srivastava S. K.* Estimation and evaluation of multi-decadal fire severity patterns using Landsat sensors. *Remote Sensing of Environment*, 2015. V. 170. P. 340–349.
- Pavleychik V. M., Kalmykova O. G., Soroka O. V.* Features of the thermal regime and humidification conditions of post-pyrogenic steppe landscapes. *Izvestia RAN. Seriya Geograficheskaya (News of the Academy of Sciences of USSR. Geographical series)*, 2020. V. 84. No. 4. P. 541–550 (in Russian). DOI: 10.31857/S2587556620040111.
- Pavleychik V. M., Myachina K. V.* Features of the thermal regime of the Earth's surface after steppe fires according to Landsat satellites. *Vestnik (Herald) of the Orenburg State University*, 2016. No. 4(192). P. 83–89 (in Russian).
- Perez C. C., Olthoff A. E., Hernandez-Trejo H., Rullan-Silva C. D.* Evaluating the best spectral indices for burned areas in the tropical Pantanos de Centla Biosphere Reserve, Southeastern Mexico. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2022. V. 25. P. 100664. DOI: 10.1016/j.rsase.2021.100664.
- Rasul A., Faqe I., Hameed H., Tansey K.* A trend of increasing burned areas in Iraq from 2001 to 2019. *Environment Development and Sustainability*, 2021. P. 1–19. DOI: 10.1007/s10668-020-00842-7.
- Röder A., Hill J., Duguay B., Alloza J. A., Vallejo R.* Using long time series of Landsat data to monitor fire events and post-fire dynamics and identify driving factors. A case study in the Ayora Region (eastern Spain). *Remote Sensing of Environment*, 2008. V. 112. No. 1. P. 259–273.
- Shinkarenko S. S.* Changes in spectral-reflective characteristics of zonal landscapes of the Northern Caspian Sea under pyrogenic effects. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 2021. V. 18. No. 3. P. 192–206 (in Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-192-206.

Sukhinin A. I., French N., Kasischke E., Hewson J., Soja A. J., Csiszar I. A., Hyer E. J., Loboda T., Conrad S. G., Romasko V. I., Pavlichenko E. A., Miskiv S. I., Slinkina O. A. AVHRR-based mapping of fires in Russia: New products for fire management and carbon cycle studies. *Remote Sensing of Environment*, 2004. V. 93. Iss. 4. P. 546–564. DOI: 10.1016/j.rse.2004.08.011.

Trigg S., Flasse S. An evaluation of different bi-spectral spaces for discriminating burned shrub-savannah. *International Journal of Remote Sensing*, 2001. V. 22. P. 2641–2647.

Tucker C. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 1979. V. 8. P. 127–150.

Ukrainsky P. A. Dynamics of spectral properties of overgrown herbaceous harem. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 2013. V. 10. No. 4. P. 229–238 (in Russian).

Weber K. T., Seefeldt S. S., Norton J. M., Finley C. Fire severity modeling of sagebrush-steppe rangelands in Southeastern Idaho. *GIScience & Remote Sensing*, 2008. V. 45. No. 1. P. 68–82.
