

Изменение спектрально-отражательных характеристик зональных ландшафтов Северного Прикаспия при пирогенном воздействии

С. С. Шинкаренко

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций
и защитного лесоразведения РАН, Волгоград, 400062, Россия
E-mail: shinkarenkos@yfanc.ru*

В исследовании изучены закономерности пирогенных изменений спектрально-отражательных свойств полупустынных и пустынных ландшафтов в год пожара. Изменение альбедо и температуры поверхности влияет на атмосферные процессы, приводя к климатическим изменениям. По этой причине необходимо изучать особенности сезонной и многолетней динамики спектрально-отражательных характеристик выгоревших площадей. Работа основана на многолетнем архиве данных детектирования активного горения, вегетационного индекса NDVI, температуры и альбедо поверхности за 2001–2019 гг. Также приводятся данные полевого спектрометрирования, демонстрирующие различия гарей, открытых почв, зелёной и сухой растительности. Установлено снижение альбедо и NDVI после пожаров в полупустынных ландшафтах на 10–20 %, которое нивелируется в конце вегетационного сезона. В пустынных ландшафтах снижения альбедо после пожаров практически не происходит, а следует рост на 15–20 %, который прослеживается в течение нескольких лет после выгорания. Для обоих типов ландшафтов характерно превышение весной и в начале лета значений NDVI у выгоревших впоследствии территорий по сравнению с негоревшими. Это связано с тем, что для распространения огня требуется определённый запас сухой растительной массы. В результате выгорают площади с большей мортмассой. Изменение альбедо поверхности в видимом и инфракрасном диапазонах может служить предиктором для алгоритмов распознавания выгоревших площадей в исследованных типах ландшафтов. Пожарный режим территории должен учитываться при исследовании атмосферных процессов и климатических изменений.

Ключевые слова: ландшафтные пожары, растительный покров, NDVI, альбедо, MODIS, Северный Прикаспий, дистанционное зондирование

Одобрена к печати: 20.05.2021
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-192-206

Введение

Регулярные ландшафтные пожары — существенный фактор динамики состояния экосистем (Ильина, 2011; Опарин и др., 2004). При этом большая часть исследований посвящается оценке степени пирогенного повреждения лесов, изучению пожарных режимов в них и динамике восстановления лесного покрова после пожара (Барталев и др., 2012а, 2017; Лупян и др., 2017; Плотникова и др., 2019; Стыценко и др., 2019), оценке эмиссии парниковых газов и других продуктов горения при лесных пожарах (Isaev et al., 2002). Природным пожарам в нелесной зоне посвящено значительно меньше исследований, которые касаются большей частью особенностей многолетней динамики величин выгоревших площадей (Павлейчик, 2019; Шинкаренко, 2018; Шинкаренко, Берденгалиева, 2019).

При этом многие авторы не только отмечают роль пожаров как фактора динамики состояния растительного и почвенного покрова, но и исследуют их влияние на изменение спектрально-отражательных и термодинамических свойств земной поверхности (Dintwe et al., 2017; Gatebe et al., 2014; Saha et al., 2019). На территории России дистанционной оценке этих аспектов пирогенных изменений нелесных ландшафтов посвящены только отдельные исследования (например, Корниенко, 2017; Павлейчик и др., 2020; Украинский, 2013). Изменение альбедо и температуры поверхности, вызванное трансформацией растительного

покрова, приводит к изменению атмосферных процессов. К примеру, при деградации растительного покрова в засушливых условиях растёт альbedo поверхности, из-за чего уменьшается атмосферное увлажнение, вследствие чего продолжается дальнейшее нарастание аридизации территории, сопровождаемое ростом отражения солнечного излучения (Золотокрылин, Титкова, 2011б). По данным исследования (Chrysoulakis et al., 2019), в Северном и Восточном Прикаспии отмечался тренд увеличения альbedo до 20 % в 2000–2015 гг. Ландшафтные пожары существенным образом меняют альbedo поверхности, причём как в сторону увеличения (Saha et al., 2019), так и в сторону снижения (Dintwe et al., 2017; Gatebe et al., 2014). Кроме того, отрицательная корреляция между альbedo и температурой поверхности может свидетельствовать об образовании новых очагов опустынивания (Золотокрылин, Титкова, 2011а). Пирогенное воздействие на аридные ландшафты сильнее всего влияет именно на значения альbedo поверхности в различных спектральных диапазонах.

В условиях интенсификации степных пожаров в Заволжско-Уральском регионе и Северном Прикаспии в XXI в. (Дубинин и др., 2010; Павлейчик, 2019; Шинкаренко, 2019а) необходимо провести оценку пирогенных изменений спектрально-отражательных характеристик земного покрова.

Цель данного исследования состоит в изучении закономерностей сезонной динамики NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс), температуры и альbedo поверхности в год пожара в засушливой зоне России и Западном Казахстане. Изучаемый район относится к семиаридной климатической зоне (Золотокрылин и др., 2020) и включает частично или полностью следующие регионы: Астраханскую, Волгоградскую, Саратовскую области, Ставропольский край, республики Калмыкию и Дагестан, а также сопредельные Западно-Казахстанскую и Атыраускую области Республики Казахстан.

Материалы и методы

Для анализа указанных выше закономерностей использовались данные дистанционного зондирования MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer): информационные продукты MODIS NDVI (MOD13Q1), MODIS Land Surface Temperature (MYD11A1) и BRDF-Albedo (*англ.* Bidirectional Reflectance Distribution Function) (MCD43A1). Первый продукт — 16-дневный композит вегетационного индекса NDVI разрешения 250 м, второй — радиометрическая температура поверхности пространственного разрешения 1000 м и временного — 8 дней. Продукт MCD43A1 содержит данные об альbedo поверхности в трёх диапазонах: видимом и инфракрасных (ИК) (ближнем (БИК) и коротковолновом) разрешения 500 м, усреднённые за 16 дней. Данные о температуре поверхности были приведены к 16-дневному разрешению. Именно временное разрешение данных альbedo и температуры подстилающей поверхности послужило основанием для выбора источника данных NDVI. На каждый год рассчитаны данные с 21 марта по 31 октября, так как в оставшийся период данные альbedo, температуры поверхности и NDVI характеризуются очень низким качеством.

Многолетний архив данных детектирования активного горения является достаточно простым и в то же время объективным инструментом оценки пожарного режима малолесных территорий (Павлейчик, 2019; Шинкаренко, 2019а; Шинкаренко и др., 2021), к которым относятся исследованные ландшафты. Для анализа изменения спектрально-отражательных характеристик использован полигональный слой очагов горения, для каждого объекта которого были рассчитаны значения NDVI, температуры поверхности и альbedo в видимом диапазоне, а также ближнем и коротковолновом ИК-диапазонах за 2001–2019 гг. Сопоставление одних и тех же данных по очагам горения, детектированным в какой-либо год, с данными по очагам горения, которые были зафиксированы в более поздние годы, позволяет проанализировать разницу между показателями выгоревших и невыгоревших участков. Это даёт возможность сопоставить сезонный ход указанных биофизических и термодинамических характеристик горевших и негоревших территорий. При этом территории, после пожаров на которых прошло

больше десяти лет, также были отнесены к негоревшим. Количество проанализированных объектов показано в *таблице*. На каждую дату были рассчитаны средневзвешенные значения NDVI, LST (*англ.* Land Surface Temperature — температура поверхности земли) и альbedo с учётом площади горевших и негоревших территорий в зависимости от ландшафтных условий за годы исследований.

Распределение проанализированных очагов горения по типам ландшафтов

Год	Количество очагов горения, тыс. шт.			
	Полупустынные		Пустынные	
	выгоревшие	негоревшие	выгоревшие	негоревшие
2001	4,4	35,1	1,1	31,9
2002	4,5	30,7	3,5	28,4
2003	1,9	28,8	0,8	27,6
2004	2,6	26,2	1,4	26,2
2005	3,7	22,5	1,2	25,0
2006	5,1	17,4	4,6	20,4
2007	2,1	15,3	3,3	17,1
2008	1,1	14,3	1,5	15,6
2009	1,5	12,8	2,3	13,3
2010	1,7	11,0	2,5	10,8
2011	0,9	14,4	1,9	10,0
2012	1,8	17,2	0,9	12,6
2013	0,2	18,9	0,1	13,2
2014	1,8	19,7	1,6	13,0
2015	1,5	21,9	0,8	13,4
2016	0,6	26,4	0,3	17,7
2017	3,2	25,4	3,7	17,3
2018	0,7	25,7	0,7	18,1
2019	0,5	26,8	0,8	19,7

В работе проанализированы два типа ландшафтов: полупустынный (преимущественно суглинистые почвы) и пустынный (преимущественно песчаные и супесчаные почвы). Анализируются только естественные зональные ландшафты, которые используются в большинстве случаев в качестве пастбищ. Использование геоинформационного слоя ландшафтной карты СССР (Швиденко, 2007) позволило определить полупустынные и пустынные типы пастбищных ландшафтов региона. Пастбища от прочих земель были отделены на основе геоинформационного продукта USGS (*англ.* United States Geological Survey — Геологическая служба США) Land Use/Land Cover System, включающего следующие категории: «пастбища», «закустаренные пастбища» и «редкая растительность» — и имеющего сходное разрешение с продуктом очагов горения MCD14ML. Точечный векторный слой очагов горения был пересечён с указанными электронными картами, благодаря чему каждому очагу горения были присвоены атрибуты типа ландшафта и земного покрова (Шинкаренко, Барталев, 2020; Шинкаренко и др., 2021), по которым проведена выборка данных (*рис. 1*, см. с. 195). Также были отфильтрованы очаги горения, соответствующие техногенным источникам, например факелам сжигания попутных газов (Архипкин и др., 2007; Терехов, Муратова, 2006)

Для сравнительного анализа сезонной динамики горевших и негоревших территорий для каждого типа ландшафта было рассчитано средневзвешенное значение показателей NDVI,

LST и альбедо на каждую дату сезона. Использование для анализа негоревших территорий только массива очагов горения обосновано следующим соображением. На территории исследований кроме ландшафтных условий очень сильно различается степень антропогенного воздействия, выраженного в пастбищных нагрузках. Данная территория подвержена деградации и опустыниванию в результате перевыпаса. Кроме того, велика доля сорочных понижений, солончаков и существующих массивов открытых песков, которые должны быть исключены из анализа, для чего необходима их предварительная идентификация. Таким образом, использование архива очагов горения как объектов анализа даёт возможность вычлнить сходные по природным условиям и степени антропогенного воздействия земли. При этом подходе возможна неопределённость оценки, вызванная разницей разрешения продуктов детектирования активного горения, альбедо, температуры и NDVI. Кроме того, сложно учесть повторяющиеся на одних и тех же участках пожары. Также пиксели очагов горения могут захватывать лишь частично выгоревшие площади.

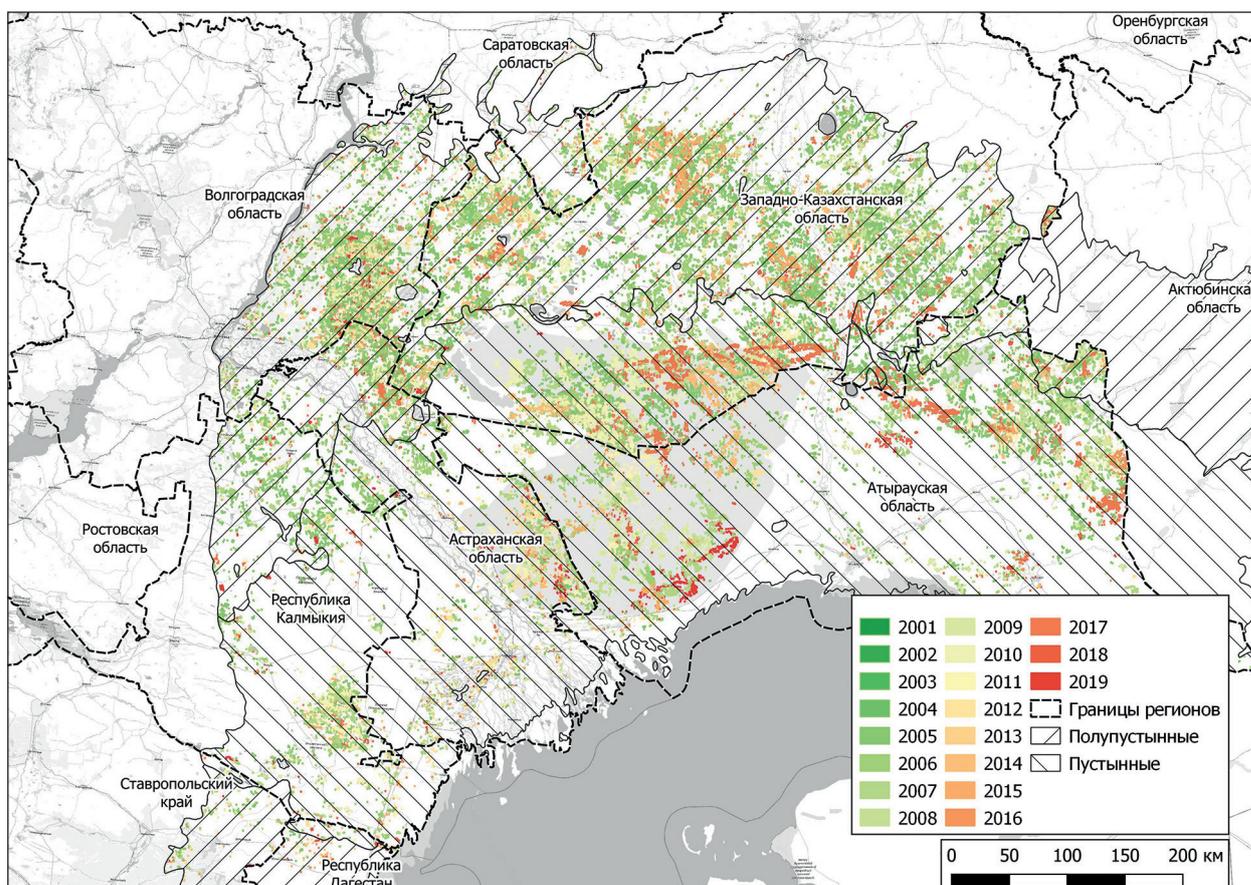


Рис. 1. Пространственно-временное распределение очагов горения MODIS в регионе исследований

Взвешивание осуществлялось на основе оценки критерия достоверности детектирования очага активного горения (*англ.* confidence). В результате получены данные отношения NDVI, температуры и альбедо поверхности горевших и негоревших пикселей, усреднённые на каждую дату с 16-дневным интервалом 2001–2019 гг. для каждого типа ландшафта:

$$\frac{Y'}{Y_0} = \frac{\sum_{i=1}^{N'} (Y'_i K_i) N_0}{\sum_{i=1}^{N_0} Y_{0i} \sum_{i=1}^{N'} K_i N'}$$

где Y' — значение показателя для выгоревшей площади; Y_0 — значение показателя для негоревшей площади; Y_i — значение показателя для i -го очага горения, выгоревшего в данный год; Y_{0i} — значение показателя для i -го очага горения, не горевшего в данный год; N' — количество выгоревших пикселей; N_0 — количество негоревших пикселей; K_i — достоверность детектирования очага горения (от 0 до 100).

Результаты и их обсуждение

В мае 2018 г. на территории Калмыкии прибором PSR-1100f спектрального разрешения 3 нм и диапазона 320–1100 нм были определены спектральные отражательные характеристики, а также установлены закономерности спектрально-отражательных характеристик разных типов земного покрова по данным полевого спектрометрирования в спектральных диапазонах, соответствующих каналам MODIS. Для зелёной растительности характерен максимум отражения в БИК-диапазоне (рис. 2). Для сухой растительности также характерен максимум отражения в БИК-канале, но значение спектральной яркости практически вдвое ниже, чем у зелёной растительности при приблизительно таких же значениях в видимом диапазоне. Свежая гарь (на следующий день после пожара) отражает всего до 5 % энергии приходящего солнечного излучения во всех спектральных диапазонах. Остальные поверхности характеризуются примерно одинаковыми соотношениями коэффициентов спектральной яркости, различаясь лишь их абсолютными значениями.

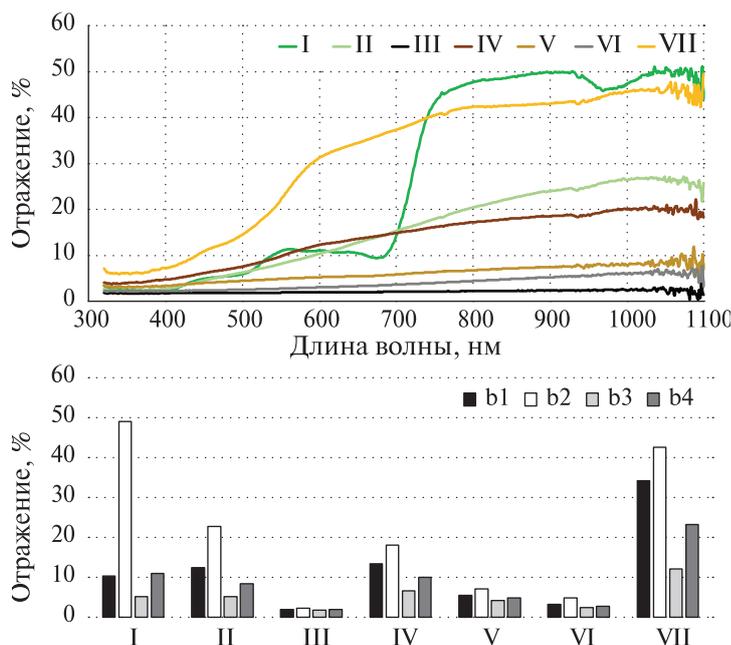


Рис. 2. Спектральные характеристики различных типов земного покрова по данным полевого спектрометрирования: I — зелёная растительность, II — растительная ветошь, III — свежая гарь, IV — открытая почва (суглинок), V — гарь и 30 % ветоши, VI — недельная гарь на суглинке, VII — открытый песок; b1–b4 — диапазоны 1–4-го каналов MODIS

На рис. 3 (см. с. 197) показана сезонная динамика среднемноголетних значений отношения NDVI, температуры поверхности и альbedo горевших и негоревших территорий в полупустынных ландшафтах. Сразу после пожаров из всех характеристик сильнее снижается альbedo поверхности, причём достаточно равномерно во всех областях спектра, фиксируемого прибором MODIS (на 20–25 % по сравнению с негоревшими). На спутниковых изображениях свежие гари характеризуются более тёмным тоном (рис. 4а, б, см. с. 198). Наиболее выражено снижение альbedo после пожаров первой декады августа, в меньшей степени — после осенних

пожаров. Индекс NDVI, напротив, сильнее уменьшается при пожарах в июле. Чем позже пожар, тем меньше снижаются значения этого индекса на горевших участках непосредственно после пожара по сравнению с негоревшими. При этом к концу октября значения NDVI выравниваются.

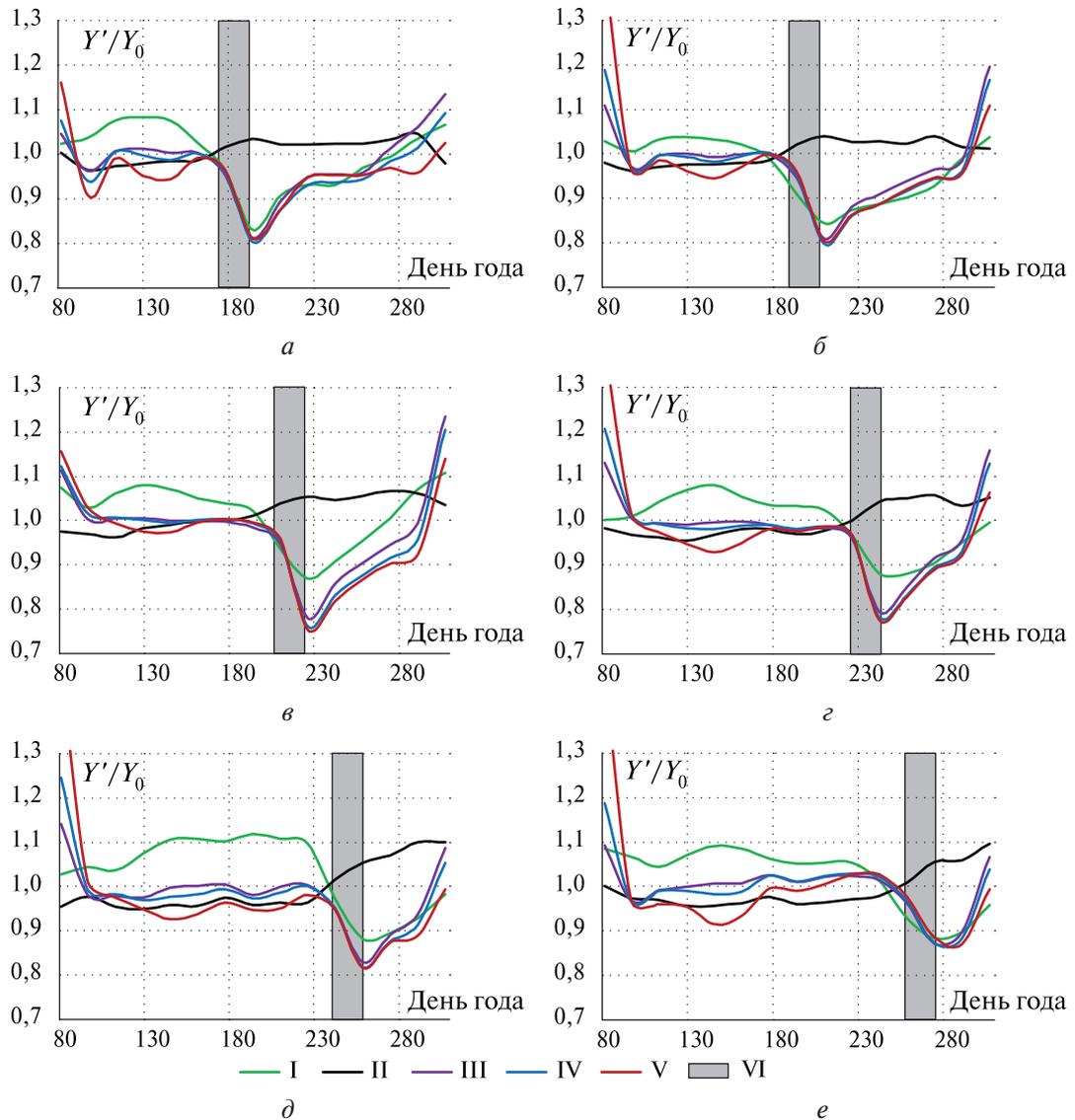


Рис. 3. Сезонная динамика отношения NDVI (I), температуры поверхности (II), альbedo в ближнем инфракрасном (III), коротковолновом инфракрасном (IV) и видимом (V) диапазонах выгоревших и негоревших полупустынных морских аккумулятивных ландшафтов; VI — даты пожаров: а — 26 июня — 11 июля, б — 12–27 июля, в — 28 июля — 12 августа, г — 13–28 августа, д — 29 августа — 13 сентября, е — 14–30 сентября

Это может быть вызвано общим снижением зелёной массы растительности осенью (большая часть растений заканчивает вегетацию), поэтому NDVI негоревшей растительности осенью существенно ниже, чем летом. Альbedo негоревших и выгоревших пикселей уже поздней осенью практически сравнивается, и только при наличии неглубокого снега наблюдаются отличия: альbedo незакрытого высоким травостоем снега характеризуется большими на 50–80 % значениями (рис. 4г). При мощности снежного покрова, превышающей высоту растительности, разница в спектрально-отражательных характеристиках сходит на нет (рис. 4д). Также в зимнее время отмечают выдувание снега с гарей (Павлейчик и др., 2020), что может вносить изменения в разницу показателей альbedo.

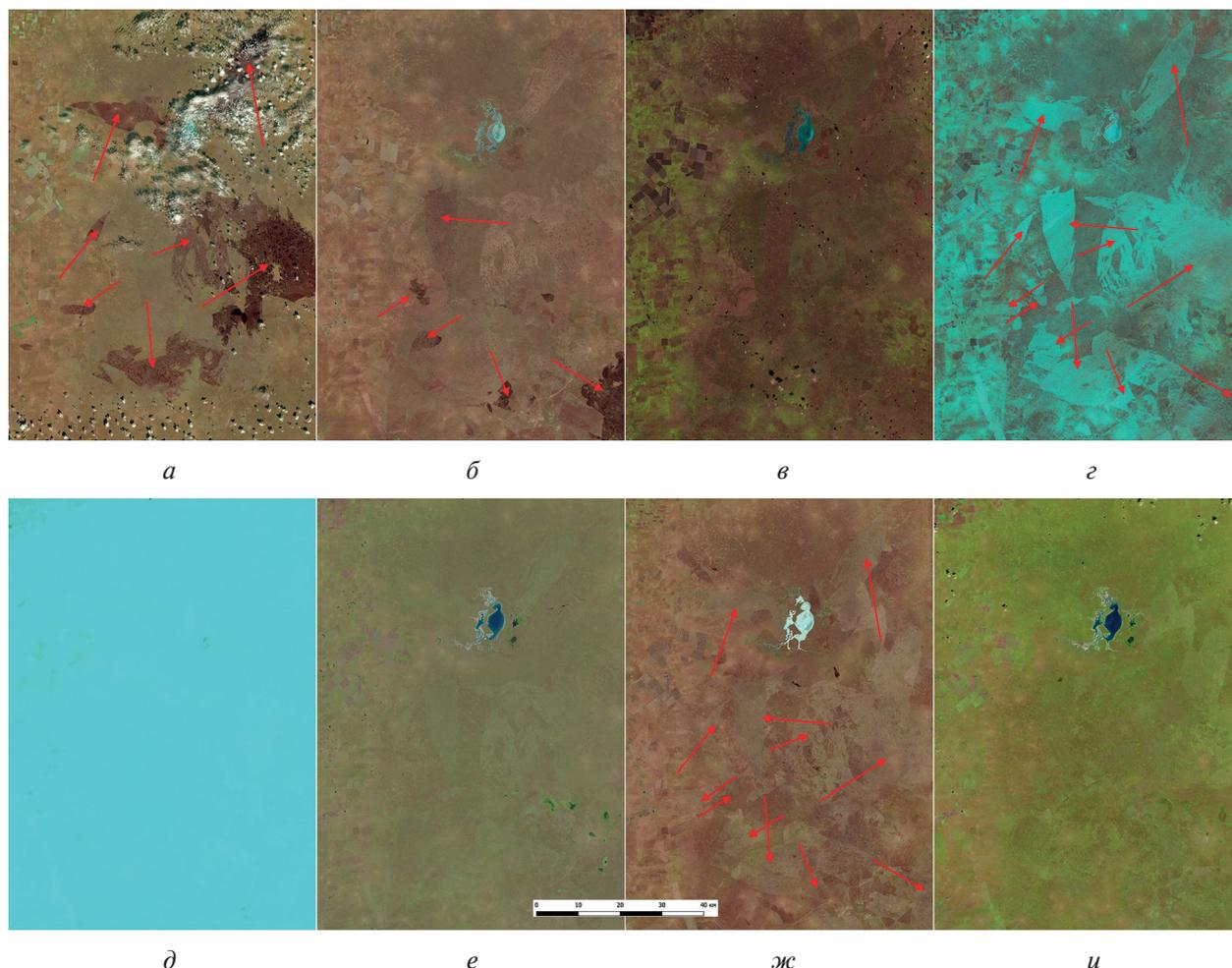


Рис. 4. Разновременные спутниковые изображения гарей, Sentinel-2: а — 24.07.2017; б — 22.09.2017; в — 16.11.2017; г — 15.01.2018; д — 06.03.2018; е — 15.05.2018; ж — 12.10.2018; и — 20.05.2019. Красными стрелками показаны выгоревшие в 2017 г. площади

Для обоих типов ландшафтов характерно превышение значений NDVI выгоревших площадей в предшествующий пожару период по сравнению с негоревшими участками. Причём у пустынных ландшафтов эта закономерность выражена намного сильнее (см. рис. 3, 5, см. с. 199). В начале сезона превышения NDVI составляют 20–30 %. Это объясняется необходимостью накопления достаточного количества горючего материала, которое может происходить на протяжении нескольких лет в условиях умеренных пастбищных нагрузок либо в течение одного вегетационного сезона при благоприятных гидротермических условиях (Шинкаренко, 2019б; Dubinin et al., 2011). На эксплуатируемых пастбищах в этом случае значения NDVI будут меньше, чем на невыпасаемых участках. Накопление растительной массы и приводит к возникновению и распространению пожаров. В пустынных ландшафтах, в отличие от полупустынных, практически никогда не происходит восстановления значений NDVI до конца сезона. При этом разница в альбедо до пожара не такая существенная — в пределах 10–15 %, наиболее выражена в видимом диапазоне.

В обоих типах ландшафтов отмечается незначительное увеличение температуры поверхности: во всех случаях в результате пожаров её значение увеличивается на величину до 10 %. Например, средняя температура поверхности в первой половине июля составляет 41–42 °С, а у выгоревших в этот период участков — 44–45 °С.

Для пустынного типа ландшафта характерен рост альбедо после пожаров вплоть до окончания вегетационного сезона (см. рис. 5). Выгоревшие площади в этом типе ландшафта характеризуются более светлым тоном, чем негоревшие, причём это заметно и через несколько

лет после пожара (рис. 6б–и, см. с. 200). Например, в конце мая 2017 г. на спутниковом изображении достаточно чётко выделяются более светлые гари 2014 г. (рис. 6а).

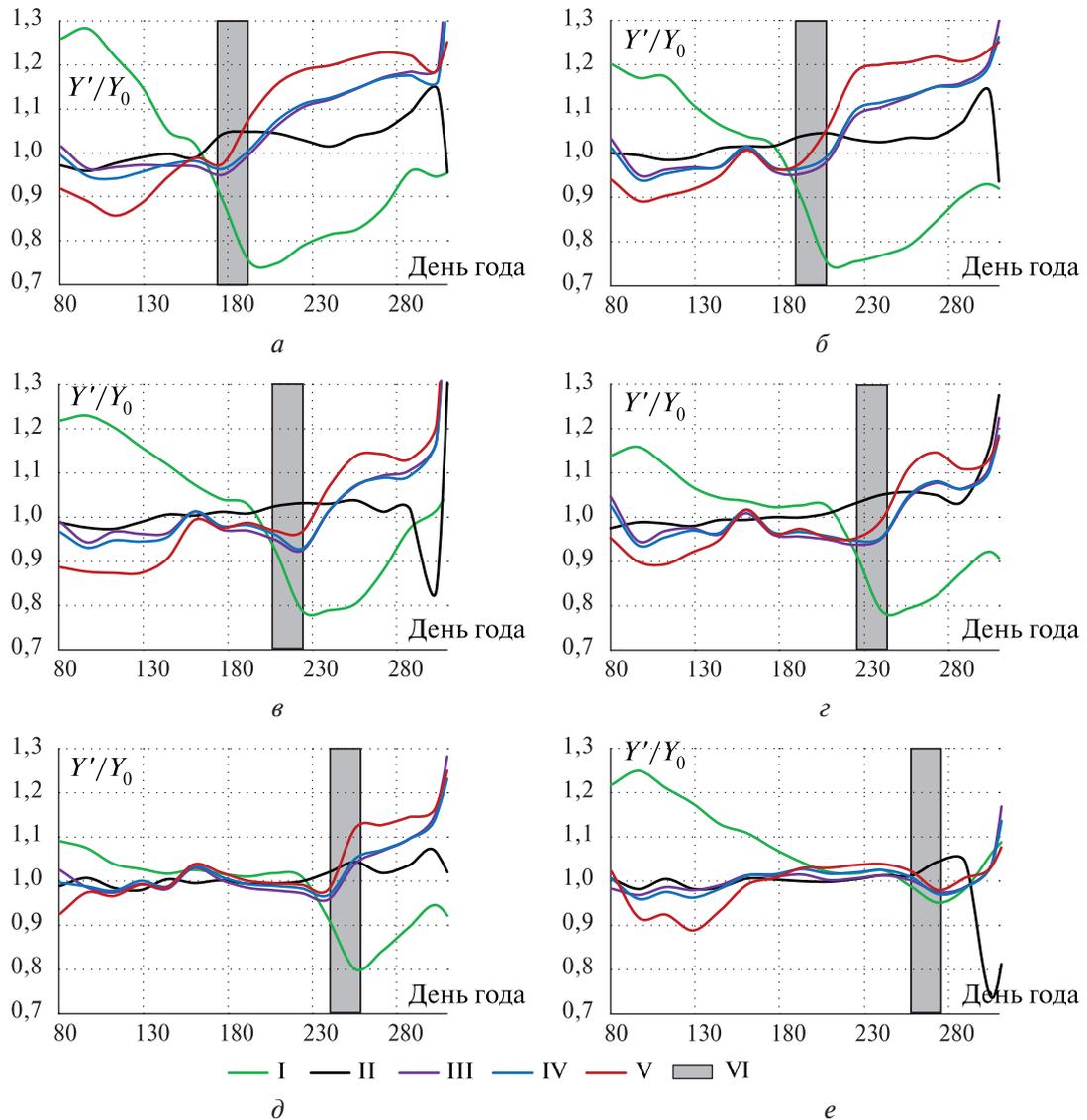


Рис. 5. Сезонная динамика отношения NDVI (I), температуры поверхности (II), альbedo в ближнем инфракрасном (III), коротковолновом инфракрасном (IV) и видимом (V) диапазонах выгоревших и негоревших северопустынных эоловых аккумулятивных ландшафтов; VI — даты пожаров: а — 26 июня — 11 июля; б — 12–27 июля; в — 28 июля — 12 августа; г — 13–28 августа; д — 29 августа — 13 сентября; е — 14–30 сентября

Визуально разница в тоне разновременных гарей прослеживается вплоть до 2020 г. Небольшое снижение альbedo (до 5 %) происходит сразу после пожаров июня–июля, но далее следует рост на 15–20 %, особенно заметный в видимом диапазоне. Пожары августа не приводят даже к кратковременному снижению альbedo, но и рост этого показателя не превышает 10–15 %. После осенних пожаров изменения NDVI, альbedo и температуры поверхности не превышают 5 %. Таким образом, пожары середины лета сильнее изменяют спектрально-отражательную способность исследованных ландшафтов.

Установленные изменения спектрально-отражательных характеристик могут стать предиктором для идентификации выгоревших площадей в исследуемых типах ландшафтов. Поскольку выгоревшие площади должны выделяться отдельно для каждого года, то и анализировать нужно динамику характеристик за один год.

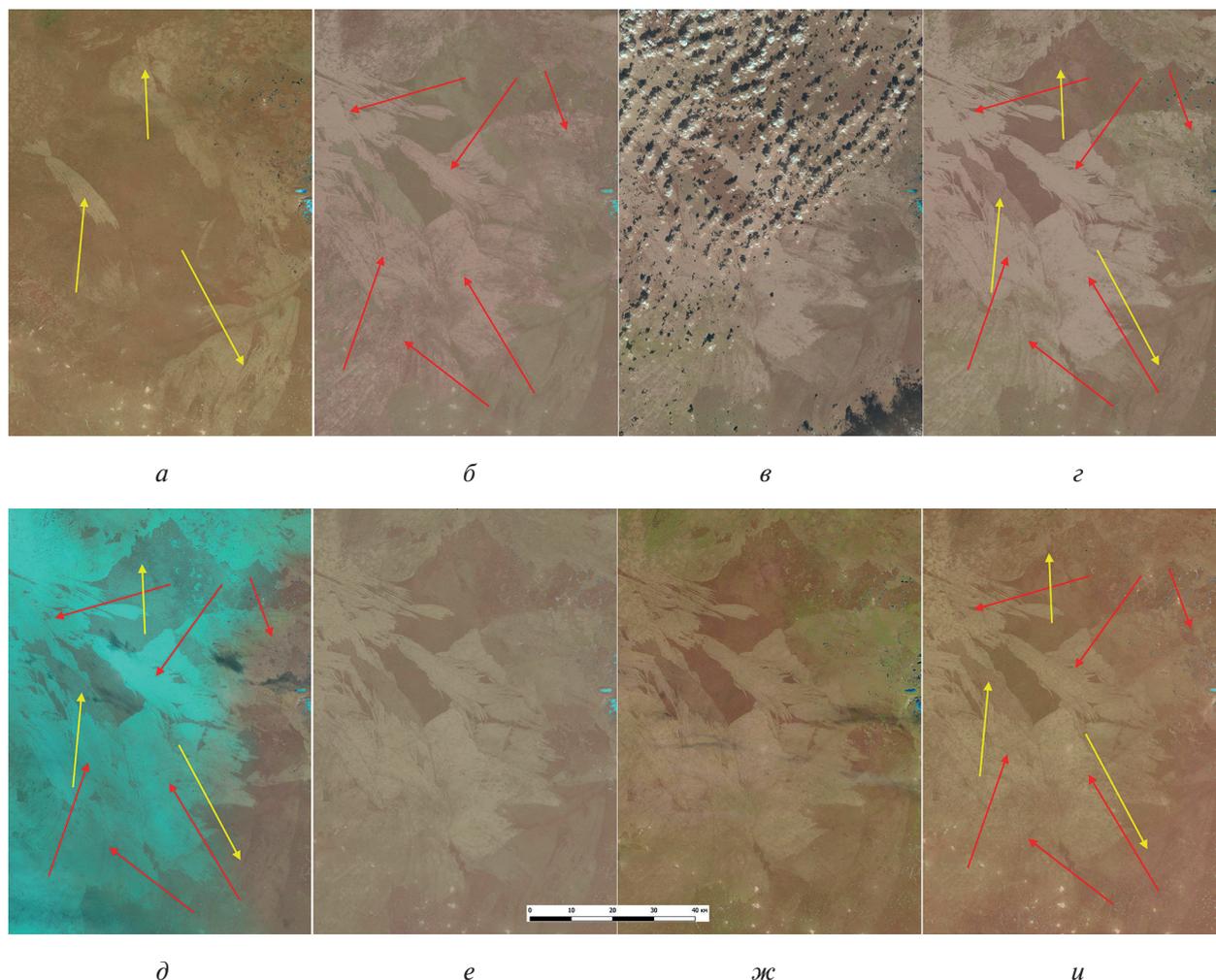


Рис. 6. Разновременные спутниковые изображения гарей, Sentinel 2: а — 29.05.2017; б — 06.09.2017; в — 31.10.2017; г — 09.04.2018; д — 05.12.2018; е — 23.06.2019; ж — 21.10.2019; и — 28.05.2020. Жёлтые стрелки — гарь 2014 г., красные — гарь 2017 г.

На рис. 7 (см. с. 201) приведены графики сезонной динамики средневзвешенных значений NDVI, температуры и альbedo поверхности пустынных и полупустынных ландшафтов за 2017 г. В этот год зафиксированы максимальные площади пожаров в регионе после 2006 г. — более 5 млн га на территории Астраханской, Волгоградской областей, Калмыкии и Западного Казахстана (Шинкаренко, 2019а). В полупустынных ландшафтах на пике вегетации в первой декаде мая совпадают значения NDVI у пикселей, которые впоследствии выгорят, и негоревших ($r = 0,99$). После пожаров в период 12–27 июля заметно снижение NDVI и у пустынных, и у полупустынных типов ландшафтов на 20 и 15 % соответственно. К концу октября значения вегетационного индекса выгоревших площадей в полупустыне восстанавливаются (что связано с осенними осадками), в то время как в пустынных ландшафтах остаются на 15–20 % ниже. В то же время тенденции послепожарной динамики NDVI совпадают как у горевших, так и не горевших участков ($r = 0,97$).

Сезонный ход температуры поверхности у всех пикселей в пустынных ландшафтах совпадает ($r = 0,99$). Полупустынные гарь характеризуются ростом температуры на 4–5 °C сразу после пожара с последующим снижением до значений негоревших участков. В пустынных ландшафтах существенных изменений температуры не произошло. Так же, как было показано выше для среднемноголетних данных, в отдельные годы после пожара наиболее сильно изменяются показатели альbedo. До пожара альbedo характеризуется синхронным ходом ($r = 0,8–0,9$ в разных диапазонах), после пожара наибольшие различия были в ИК-диапазоне

($r = 0,29$ в полупустыне и $r = 0,57$ в пустыне). В пустынных ландшафтах отмечен рост альbedo в ближнем ИК-диапазоне на 15–17 %, в полупустыне — снижение альbedo на аналогичную величину.

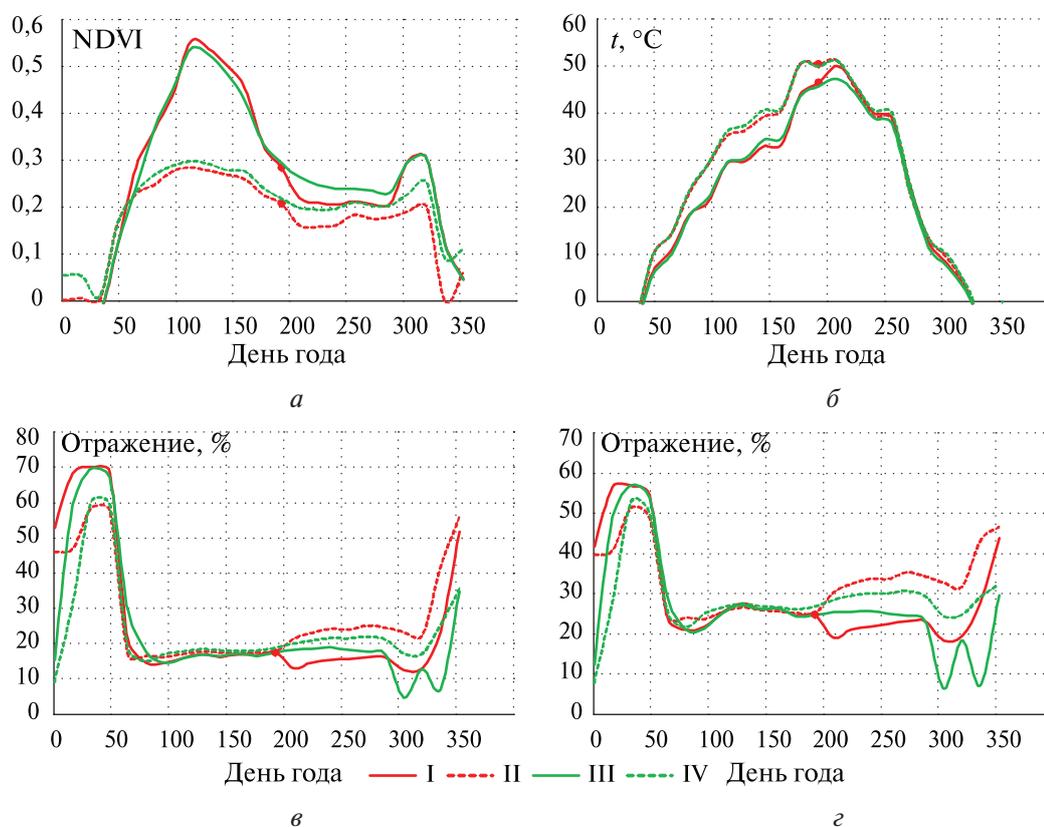


Рис. 7. Динамика средневзвешенных значений NDVI (а), температуры поверхности (б), альbedo в коротковолновом (в) и ближнем инфракрасном (г) диапазонах в 2017 г. Полупустынные ландшафты: I — выгоревшие, III — негоревшие; пустынные ландшафты: II — выгоревшие, IV — негоревшие. Красный маркер — период пожаров с 12 по 27 июля

Осенью 2017 г. выгоревшие площади в полупустыне имеют более низкие значения доли отражённого солнечного излучения, а в пустыне — более высокие. Уже в 2018 г. альbedo полупустынных ландшафтов практически выравнивается, только у отдельных гарей отмечены более высокие значения, в 2019–2020 гг. изменения альbedo в этом типе ландшафтов связаны уже с новыми выгораниями. В пустынных ландшафтах изменения альbedo прослеживаются и осенью 2020 г.

Таким образом, природные пожары в полупустынных и пустынных ландшафтах приводят к существенным изменениям спектрально-отражательных характеристик, которые прослеживаются до конца вегетационного сезона в год пожара, а также в течение нескольких лет после. Эта особенность пирогенного воздействия может быть использована для идентификации выгоревших площадей в засушливых условиях, а также должна учитываться в исследованиях динамики растительного покрова и климата.

Заключение

В полупустынных ландшафтах на суглинистых почвах наиболее сильное изменение альbedo наблюдается непосредственно после пожара, в это время доля отражённого солнечного излучения снижается на 20–30 % как в видимом, так и в ближнем и коротковолновом ИК-диапазонах. В пустынных ландшафтах альbedo, наоборот, после незначительного снижения сразу

после пожара существенно возрастает. Поскольку альbedo поверхности оказывает влияние на динамику атмосферных процессов, то особенности пирогенного изменения спектрально-отражательных характеристик обязательно должны учитываться при изучении динамики климата на региональном уровне.

Альbedo поверхности — достаточно надёжный предиктор для автоматизированного распознавания выгоревших площадей в аридных ландшафтах. Эта спектрально-отражательная характеристика наиболее сильно реагирует на пирогенные изменения в исследованных типах ландшафтов. Использование альbedo поверхности с учётом ландшафтных особенностей может быть достаточно перспективным направлением для разработки автоматизированных алгоритмов идентификации выгоревших площадей в аридной зоне России и сопредельных территорий. Также ландшафтные условия должны учитываться при разработке алгоритмов идентификации выгоревших площадей на основе других показателей. Кроме того, выявленные закономерности изменения спектрально-отражательных характеристик помогут более точно определить особенности пирогенного воздействия на окружающей среду.

В дальнейшем будет проведена работа по анализу изменений спектрально-отражательных характеристик при пирогенном воздействии на основе картографических слоёв выгоревших площадей. Это позволит повысить достоверность оценок влияния пожаров на термодинамические и биофизические параметры земного покрова в аридных условиях за счёт учёта повторяемости пожаров и более точного определения границ гарей.

Работа выполнена в рамках темы Института космических исследований РАН «Мониторинг» (госрегистрация № 01.20.0.2.00164), а также по теме научно-исследовательской работы Федерального научного центра агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН № 0713-2019-0001 с использованием инфраструктуры Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015) и возможностей информационного сервиса «Вега» (Барталев и др., 2012б).

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. № 4. С. 103–110.
2. *Барталев С. А., Егоров В. А., Ефремов В. Ю., Лупян Е. А., Стыценко Ф. В., Флитман Е. В.* (2012а) Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+ // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т. 9. № 2. С. 9–26.
3. *Барталев С. А., Ершов Д. В., Лупян Е. А., Толпин В. А.* (2012б) Возможности использования спутникового сервиса ВЕГА для решения различных задач мониторинга наземных экосистем // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т. 9. № 1. С. 49–56.
4. *Барталев С. А., Стыценко Ф. В., Хвостиков С. А., Лупян Е. А.* Методология мониторинга и прогнозирования пирогенной гибели лесов на основе данных спутниковых наблюдений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14. № 6. С. 176–193. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-176-193.
5. *Дубинин М. Ю., Луцкекина А. А., Раделоф Ф. К.* Оценка современной динамики пожаров в аридных экосистемах по материалам космической съемки (на примере Чёрных земель) // *Аридные экосистемы*. 2010. Т. 6. № 3. С. 5–16.
6. *Золотокрылин А. Н., Титкова Т. Б.* (2011а) Новый подход к мониторингу очагов опустынивания // *Аридные экосистемы*. 2011. Т. 7. № 3. С. 14–22.
7. *Золотокрылин А. Н., Титкова Т. Б.* (2011б) Тенденция опустынивания Северо-Западного Прикаспия по MODIS-данным // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2011. Т. 8. № 2. С. 217–225.
8. *Золотокрылин А. Н., Черенкова Е. А., Титкова Т. Б.* Аридизация засушливых земель европейской части России и связь с засухами // *Изв. Российской акад. наук. Сер. географическая*. 2020. Т. 84. № 2. С. 207–217. DOI: 10.31857/S258755662002017X.

9. *Ильина В. Н.* Пирогенное воздействие на растительный покров // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2011. Т. 20. № 2. С. 4–30.
10. *Корниенко С. Г.* Изучение трансформаций тундрового почвенного покрова на участках пирогенного поражения по данным спутников Landsat // Криосфера Земли. 2017. Т. 21. № 1. С. 93–104. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-1(93-104).
11. *Лулян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашицкий А. В., Мазуров А. А., Матвеев А. М., Суднева О. А., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А.* Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
12. *Лулян Е. А., Барталев С. А., Балашов И. В., Егоров В. А., Еришов Д. В., Кобец Д. А., Сенько К. С., Стыценко Ф. В., Сычугов И. Г.* Спутниковый мониторинг лесных пожаров в 21 веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активного горения) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 158–175. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.
13. *Опарин М. Л., Опарина О. С., Цветкова А. А.* Выпас как фактор трансформации наземных экосистем семиаридных регионов // Поволжский экологический журн. 2004. № 2. С. 183–199.
14. *Павлейчик В. М.* Широтно-зональная неоднородность развития травяных пожаров в Заволжско-Уральском регионе // Бюл. Оренбургского науч. центра УрО РАН. 2019. № 2. С. 1–14. DOI: 10.24411/2304-9081-2019-12013.
15. *Павлейчик В. М., Калмыкова О. Г., Сорока О. В.* Особенности теплового режима и увлажнения постпирогенных степных ландшафтов // Изв. Российской акад. наук. Сер. географическая. 2020. Т. 84. № 4. С. 541–550. DOI: 10.31857/S2587556620040111.
16. *Плотникова А. С., Еришов Д. В., Харитонова А. О., Шуляк П. П., Барталев С. А., Стыценко Ф. В.* Пространственная оценка современных пожарных режимов лесных экосистем России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 228–240. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-228-240.
17. *Стыценко Ф. В., Барталев С. А., Букась А. В., Еришов Д. В., Сайгин И. А.* Возможности пролонгированной оценки постпожарного состояния хвойных вечнозелёных лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 217–227. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-217-227.
18. *Терехов А. Г., Муратова Н. Р.* Детектирование тепловых источников в Казахском секторе Каспийского региона по данным NOAA/AVHRR // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Т. 1. № 3. С. 134–142.
19. *Украинский П. А.* Динамика спектральных свойств зарастающих травяных гарей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 229–238.
20. *Швиденко А., Щепаченко Д., МакКаллум Я., Нильссон С.* Леса и лесное хозяйство России / Международный ин-т прикладного системного анализа, Российская акад. наук. Лаксенбург, Австрия. 2007. Электрон. дан. и прогр. 1 электрон. опт. диск CD-ROM. URL: http://www.iiasa.ac.at/Research/FOR/forest_cdrom/index.html.
21. *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. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-138-146.
22. *Шинкаренко С. С.* (2019а) Пожарный режим ландшафтов Северного Прикаспия по данным очагов активного горения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 121–133. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-121-133.
23. *Шинкаренко С. С.* (2019б) Пространственно-временная динамика опустынивания на Чёрных землях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 155–168. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-155-168.
24. *Шинкаренко С. С., Барталев С. А.* Сезонная динамика NDVI пастбищных ландшафтов Северного Прикаспия по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 179–194. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-179-194.
25. *Шинкаренко С. С., Берденгалиева А. Н.* Анализ многолетней динамики степных пожаров в Волгоградской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 98–110. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-98-110.
26. *Шинкаренко С. С., Дорошенко В. В., Берденгалиева А. Н., Комарова И. А.* Динамика горимости аридных ландшафтов России и сопредельных территорий по данным детектирования активного горения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 149–164. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-149-164.
27. *Chrysoulakis N., Mitraka Z., Gorelick N.* Exploiting satellite observations for global surface albedo trends monitoring // Theoretical and Applied Climatology. 2019. V. 137. P. 1171–1179. DOI: 10.1007/s00704-018-2663-6.

28. *Dintwe K., Okin G.S., Xue Y.* Fire-induced albedo change and surface radiative forcing in sub-Saharan Africa savanna ecosystems: Implications for the energy balance // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 2017. V. 122. P. 6186–6201. DOI: 10.1002/2016JD026318.
29. *Dubinina M., Lushchikina A., Radeloff V.C.* Climate, Livestock, and Vegetation: What Drives Fire Increase in the Arid Ecosystems of Southern Russia? // *Ecosystems*. 2011. V. 14. P. 547–562. DOI: 10.1007/s10021-011-9427-9.
30. *Gatebe C.K., Ichoku C.M., Poudya R., Román M.O., Wilcox E.* Surface albedo darkening from wildfires in northern sub-Saharan Africa // *Environmental Research Letters*. 2014. V. 9. No. 6. P. 065003. DOI: 10.1088/1748-9326/9/6/065003.
31. *Isaev A.S., Korovin G.N., Bartalev S.A., Ershov D.V., Janetos A.C., Kasischke E.S., Shugart H.H., French N.H., Orlick B.E., Murphy T.L.* Using Remote Sensing to Assess Russian Forest Fire Carbon Emissions // *Climate Change*. 2002. V. 55. No. 1–2. P. 235–249. DOI: 10.1023/A:1020221123884.
32. *Saha M.V., D'odorico P., Scanlon T.M.* Kalahari Wildfires Drive Continental Post-Fire Brightening in Sub-Saharan Africa // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. P. 1090. DOI: 10.3390/rs11091090.

Changes in spectral reflectance characteristics of the Northern Caspian zonal landscapes under pyrogenic influence

S. S. Shinkarenko

*Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Meliorations
and Agroforestry RAS, Volgograd 400062, Russia
E-mail: shinkarenkos@vfanc.ru*

The article studies the regularities of pyrogenic changes in the spectral-reflective properties of semi-desert and desert landscapes in the year of fire. Changes in albedo and surface temperature affect atmospheric processes and lead to climatic changes. For this reason, it is necessary to study the features of seasonal and years long dynamics of the spectral-reflective characteristics of burned-out areas. The research is based on the long-term archive of data on the detection of active combustion, NDVI vegetation index, temperature and surface albedo over the period 2001–2019. The article presents field spectrometry data showing the differences in burned areas, open soils, green and dry vegetation. We have revealed a decrease in albedo and NDVI after fires in semi-desert landscapes by 10–20 %, which levels off at the end of the growing season. In desert landscapes, there is practically no decrease in albedo after fires, but an increase of 15–20 % follows, which can be traced for several years after burnout. For both types of landscapes, an excess of NDVI values in subsequently burnt-out territories is typical as compared to unburned ones. This is due to the fact that a certain supply of dry plant matter is required for the spread of fire. As a result, areas with a larger mortmass are burned out. The change in the surface albedo in the visible and infrared ranges can serve as a predictor for the algorithms used for recognizing burned-out areas in the studied types of landscapes. The fire regime of the territory should be taken into account when studying atmospheric processes and climatic changes.

Keywords: landscape fires, vegetation cover, NDVI, albedo, MODIS, Northern Caspian, remote sensing

Accepted: 20.05.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-192-206

References

1. Arkhipkin O.P., Spivak L.F., Sagatdinova G.N., Five-year experience of operational space monitoring of fires in Kazakhstan, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2007, Vol. 1. No. 4, pp. 103–110 (in Russian).

2. Bartalev S. A., Egorov V. A., Efremov V. Yu., Loupian E. A., Stytsenko F. V., Flitman E. V. (2012a), Integrated burnt area assessment based on combine use of multi-resolution MODIS and Landsat-TM/ETM+ satellite data, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 9–26 (in Russian).
3. Bartalev S. A., Ershov D. V., Loupian E. A., Tolpin V. A. (2012b), Possibilities of satellite service VEGA using for different tasks of land ecosystems monitoring, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 1, pp. 49–56 (in Russian).
4. Bartalev S. A., Stytsenko F. V., Khvostikov S. A., Loupian E. A., Methodology of post-fire tree mortality monitoring and prediction using remote sensing data, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 176–193 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-176-193.
5. Dubinin M. Yu., Lushchekina A. A., Radelof F. K., Assessment of modern burning dynamics in arid ecosystems using remote sensing data (case study of Chernye zemli), *Aridnye ekosistemy*, 2010, Vol. 6, No. 3, pp. 5–16 (in Russian).
6. Zolotokrylin A. N., Titkova T. B. (2011a), New approach to desertification seats monitoring, *Aridnye ekosistemy*, 2011, Vol. 7, No. 3, pp. 14–22 (in Russian).
7. Zolotokrylin A. N., Titkova T. B. (2011b), Desertification tendency in North-West Caspian region according to MODIS data, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 2, pp. 217–225 (in Russian), DOI: 10.31857/S258755662002017X.
8. Zolotokrylin A. N., Cherenkova E. A., Titkova T. B., Aridization of drylands in the European part of Russia: secular trends and links to droughts, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Ser. geograficheskaya*, 2020, Vol. 84, No. 2, pp. 207–217 (in Russian).
9. Il'ina V. N., Impact of fires on the vegetation cover, *Samarskaya Luka: problemy regional'noi i global'noi ekologii*, 2011, Vol. 20, No. 2, pp. 4–30 (in Russian).
10. Kornienko S. G., Transformation of tundra land cover at the sites of pyrogenic disturbance: studies based on Landsat satellite data, *Kriosfera Zemli*, 2017, Vol. 21, No. 1, pp. 93–104 (in Russian), DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-1(93-104).
11. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskiy A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284 (in Russian).
12. Loupian E. A., Bartalev S. A., Balashov I. V., Egorov V. A., Ershov D. V., Kobets D. A., Senko K. S., Stytsenko F. V., Sychugov I. G., Satellite monitoring of forest fires in the 21st century in the territory of the Russian Federation (facts and figures based on active fires detection), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 158–175 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.
13. Oparin M. L., Oparina O. S., Tsvetkova A. A., Grazing as a factor in the transformation of terrestrial ecosystems of semiarid regions, *Povolzhskii ekologicheskii zhurnal*, 2004, No. 2, pp. 183–199 (in Russian).
14. Pavleichik V. M., The latitudinal-zonal heterogeneity of the development of grass fires in the Volga-Ural region, *Byulleten' Orenburgskogo nauchnogo tsentra UrO RAN*, 2019, No. 2, pp. 1–14 (in Russian), DOI: 10.24411/2304-9081-2019-12013.
15. Pavleichik V. M., Kalmykova O. G., Soroka O. V., Features of the Thermal Regime and Humidification of Post-Pyrogenic Steppe Landscapes, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Ser. geograficheskaya*, 2020, Vol. 84, No. 4, pp. 541–550 (in Russian), DOI: 10.31857/S2587556620040111.
16. Plotnikova A. S., Ershov D. V., Kharitonova A. O., Shulyak P. P., Bartalev S. A., Stytsenko F. V., Spatial assessment of modern forest fire regimes in Russia, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 228–240 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-228-240.
17. Stytsenko F. V., Bartalev S. A., Bukas A. V., Ershov D. V., Saigin I. A., The possibilities of prolonged burnt severity assessment of evergreen coniferous forest using multi-spectral satellite data, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 217–227 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-217-227.
18. Terekhov A. G., Muratova N. R., Detection of thermal sources in the Kazakhstan sector of the Caspian region according to NOAA/AVHRR, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2006, Vol. 1, No. 3, pp. 134–142 (in Russian).
19. Ukrainskii P. A., Dynamics of the spectral properties of overgrown burned grass areas, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 4, pp. 229–238 (in Russian).
20. Shvidenko A., Shchepashchenko D., McCallum I., Nilsson S., *Lesnaya i lesnoye khozyaistvo Rossii* (Russian forests and forestry), Mezhdunarodnyi institut prikladnogo sistemnogo analiza, Rossiiskaya Akademiya nauk (Intern. Institute for Applied Systems Analysis and the Russian Academy of Science), Laxenburg, Austria, 2007, available at: https://webarchive.iiasa.ac.at/Research/FOR/forest_cdrom/home_en.html.

21. Shinkarenko S.S., Assessment of steppe burning dynamics in Astrakhan Region, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 1, pp. 138–146 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-138-146.
22. Shinkarenko S.S. (2019a), Fire regime of North Caspian landscapes according to the data of active burning centers, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 1, pp. 121–133 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-121-133.
23. Shinkarenko S.S. (2019b), Spatial-temporal dynamics of desertification in Black Lands, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 155–168 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-155-168.
24. Shinkarenko S.S., Bartalev S.A., NDVI seasonal dynamics of the North Caspian pasture landscapes according to MODIS data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 4, pp. 179–194 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-179-194.
25. Shinkarenko S.S., Berdengalieva A.N., Analysis of steppe fires long-term dynamics in Volgograd Region, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 98–110 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-98-110.
26. Shinkarenko S.S., Doroshenko V.V., Berdengalieva A.N., Komarova I.A., Dynamics of arid landscapes burning of Russia and adjacent territories according to active fire data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 1, pp. 149–164 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-149-164.
27. Chrysoulakis N., Mitraka Z., Gorelick N., Exploiting satellite observations for global surface albedo trends monitoring, *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, Vol. 137, pp. 1171–1179, DOI: 10.1007/s00704-018-2663-6.
28. Dintwe K., Okin G.S., Xue Y., Fire-induced albedo change and surface radiative forcing in sub-Saharan Africa savanna ecosystems: Implications for the energy balance, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, Vol. 122, pp. 6186–6201, DOI: 10.1002/2016JD026318.
29. Dubinin M., Lushkina A., Radeloff V.C., Climate, Livestock, and Vegetation: What Drives Fire Increase in the Arid Ecosystems of Southern Russia? *Ecosystems*, 2011, Vol. 14, pp. 547–562, DOI: 10.1007/s10021-011-9427-9.
30. Gatebe C.K., Ichoku C.M., Poudya R., Román M.O., Wilcox E., Surface albedo darkening from wild-fires in northern sub-Saharan Africa, *Environmental Research Letters*, 2014, Vol. 9, No. 6, p. 065003, DOI: 10.1088/1748-9326/9/6/065003.
31. Isaev A.S., Korovin G.N., Bartalev S.A., Ershov D.V., Janetos A.C., Kasischke E.S., Shugart H.H., French N.H., Orlick B.E., Murphy T.L., Using Remote Sensing to Assess Russian Forest Fire Carbon Emissions, *Climate Change*, 2002, Vol. 55, No. 1–2, pp. 235–249, DOI: 10.1023/A:1020221123884.
32. Saha M.V., D'odorico P., Scanlon T.M., Kalahari Wildfires Drive Continental Post-Fire Brightening in Sub-Saharan Africa, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, p. 1090, DOI: 10.3390/rs11091090.