Динамика горимости аридных ландшафтов России и сопредельных территорий по данным детектирования активного горения

С. С. Шинкаренко [1,2,3], В. В. Дорошенко [3], А. Н. Берденгалиева [3], И. А. Комарова [3]

[1] *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*
[2] *Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, Волгоград, 400062, Россия*
[3] *Волгоградский государственный университет, Волгоград, 400062, Россия*
E-mail: shinkarenko@volsu.ru

Статья посвящается анализу многолетней динамики количества и плотности очагов активного горения в аридных ландшафтах европейской части России и сопредельных территорий Западного Казахстана. На основе многолетнего архива детектирования очагов активного горения (горячих точек, термоточек) за 2001–2019 гг. определены сезонные и многолетние закономерности динамики их количества и плотности в разрезе регионов и типов земного покрова. На первом этапе были определены и отделены техногенные источники горячих точек, далее архив термоточек был сгруппирован по регионам и типам земного покрова. Наибольшая плотность горячих точек характерна для пойменных ландшафтов речных долин и культивируемых земель. Установлено устойчивое снижение горимости всех категорий использования земель после 2010–2011 гг. Особенно сильное снижение числа и плотности очагов активного горения характерно для пахотных земель. Половина всех термоточек в регионе исследований фиксируется летом, оставшаяся часть почти поровну распределяется между весной и осенью. Снижение горимости происходит главным образом за счёт летних и осенних пожаров. Особенно это характерно для мозаики пашен с другими типами земного покрова. Сезонное распределение горячих точек по территории исследований соответствует широтно-зональным особенностям ландшафтов, природопользования и расселения: для северных районов преобладающими становятся весенние палы в апреле, а также сельскохозяйственные палы в августе и сентябре, а на пастбищах полупустыни и пустыни большая часть очагов активного горения отмечена в июле и июне. Выявленные закономерности динамики горимости позволят более эффективно организовывать противопожарные мероприятия, а также послужат основой для подбора спутниковых данных для дальнейшего визуального определения выгоревших площадей.

Ключевые слова: ландшафтные пожары, MODIS, Северный Прикаспий, Прикаспийская низменность, Западный Казахстан, дистанционное зондирование, аридные ландшафты, юг России

Одобрена к печати: 30.01.2021
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-149-164

Введение

Данные детектирования активного горения (термоточки, горячие точки, далее — ГТ) традиционно используются для оперативного мониторинга природных пожаров, также на их основе разрабатываются различные алгоритмы идентификации выгоревших площадей. Исследование охватывает все регионы европейской части России, которые целиком или частично относятся к семиаридной климатической зоне (Золотокрылин и др., 2020) и полупустынному или пустынному типам ландшафта: Саратовскую, Оренбургскую, Волгоградскую, Астраханскую области, Ставропольский край, Республику Калмыкия, Дагестан и Чеченскую Республику. Кроме того, в трансграничных условиях изучаемой территории часто отмечается распространение пожаров на земли сопредельного Западного Казахстана и наоборот. Поэтому работа также охватывает Актюбинскую, Западно-Казахстанскую (ЗКО) и Атыраускую области Казахстана.

Исследуемые территории относятся к категории малолесных (лесистость большинства регионов не превышает нескольких процентов), соответственно преобладающая часть пожаров происходит на сельскохозяйственных землях и в естественных зональных геосистемах с травянистой растительностью. Природные пожары являются экзогенным фактором (Ильина, 2011), существенно влияют на состояние экосистем и структуру растительности (Немков, Сапига, 2010), спектрально-отражательные характеристики земного покрова (Украинский, 2013). Поэтому при комплексных ландшафтных исследованиях, в том числе на основе данных дистанционного зондирования, обязательным этапом должно быть определение пространственных, многолетних и сезонных закономерностей пожарного режима (Опарин, Опарина, 2003; Швиденко, Щепащенко, 2013).

Из-за специфики ландшафтных условий травяные пожары по сравнению с лесными отличаются относительно низкой температурой горения, быстрым остыванием гарей и высокой скоростью распространения. Поэтому алгоритмы выделения пройденных огнём площадей, основанные на кластеризации ГТ, которые относятся к одному пожару, фиксируют несколько гарей, соответствующих группам ГТ фронта того же пожара в момент пролёта спутника. В то же время каждой ГТ или выгоревшему пикселю зачастую соответствует меньшая площадь (Лупян и др., 2017). Имеющиеся информационные продукты выгоревших площадей (MCD45A1, MCD64A1, FireCCI51, AVHRR-LTDR (AVHRR — *англ*. Advanced Very High Resolution Radiometer; LTDR — *англ*. Long Term Data Record), GFED (*англ*. Global Fire Emissions Database), ИСДМ-Рослесхоз (Информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства) и др.) по описанным выше причинам также не имеют достаточной достоверности при детектировании гарей в аридных ландшафтах. Особенно при низкой сомкнутости травостоя. Например, в условиях Астраханской обл. продукт MCD45A1 охватывает только 40–50 % реальной выгоревшей площади зональных ландшафтов, доля детектированных гарей в интразональных ландшафтах Волго-Ахтубинской поймы и дельты Волги ещё ниже (Шинкаренко, 2017).

До сих пор одним из наиболее точных методов определения выгоревших площадей в аридных ландшафтах остаётся визуальное дешифрирование цветовых композитов спутниковых данных разрешения не ниже среднего с включением ближнего и коротковолнового инфракрасных каналов с полевым эталонированием для выявления точных дешифровочных признаков. Экспертное определение гарей по спутниковым данным среднего и высокого разрешения позволяет с высокой точностью фиксировать их границы (Дубинин и др., 2010; Шинкаренко, Берденгалиева, 2019; Hall et al., 2016). Этот подход также не лишён недостатков: трудоёмкость, которая влечёт огромные временные затраты, и субъективность дешифровщика (Барталев и др., 2012а). Работе по визуальному дешифрированию должно предшествовать предварительное исследование пространственно-временных закономерностей динамики горимости территории, по результатам которого подбирают данные дистанционного зондирования для выделения выгоревших контуров. На этом этапе определяются сезонные и многолетние особенности распределения ГТ в отдельных регионах или районах. Далее подбираются спутниковые данные необходимого разрешения и временного охвата. Информационные продукты детектирования активного горения и выгоревших площадей служат для дополнительной верификации при визуальном дешифрировании и могут быть получены с помощью сервиса ВЕГА-Science (Барталев и др., 2012б), развиваемого Институтом космических исследований РАН в Центре коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015).

Цель исследования заключается в определении пространственно-временных особенностей ландшафтных пожаров аридной зоны европейской части России и сопредельных территорий в зависимости от типа земного покрова. Ранее для территории Северного Прикаспия были определены закономерности распределения ГТ в зависимости от ландшафтных условий (Шинкаренко, 2019б). В результате было установлено, что многолетний архив ГТ позволяет достаточно объективно оценивать горимость малолесных территорий, что также подтверждается рядом других исследований (Павлейчик, 2019; Shinkarenko et al., 2020). В количественном отношении до половины пожаров площадью 1–2 км^2 в исследуемом районе не детектируются

продуктом ГТ по данным MODIS (*англ*. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), что соответствует всего нескольким процентам пройденных огнём территорий (Шинкаренко, 2019а). В дальнейшем будет проведено визуальное дешифрирование выгоревших площадей и дана оценка пожарного режима рассматриваемой территории.

Материалы и методы

Исследование основано на пространственном анализе многолетнего архива данных детектирования очагов активного горения (прибор MODIS, спутники Terra и Aqua, продукт MCD14ML, версия 6) разрешения 1 км. Ошибка омиссии (доля пропусков) для территорий с лесистостью менее 20 % в среднем по земному шару у этого продукта для гарей более 10 га составляет менее 20 % (Giglio et al., 2016). Для больших по площади пожаров точность детектирования возрастает (Барталев и др., 2017; Giglio et al., 2006; Hawbaker et al., 2008; Masocha et al., 2018). Например, для гарей площадью более 50 га на землях, покрытых лесом до 20 %, ошибка омиссии составляет уже менее 5 %. А средняя ошибка комиссии (доля ложных срабатываний) для изучаемого региона равна 3 % (Giglio et al., 2016). В исследуемом районе преобладающая часть выгоревших площадей представлена за счёт очень крупных пожаров площадью в тысячи и десятки тысяч гектаров (Шинкаренко, 2018, 2019а; Шинкаренко, Берденгалиева, 2019), поэтому использование указанного информационного продукта оправдано.

Типы земного покрова определялись по информационному продукту USGS Land Use/Land Cover System (USGS — *англ*. United States Geological Survey, Геологическая служба США) с разрешением 0,008° (примерно 900 м), что практически соответствует размеру ГТ. Легенда продукта USGS Land Use/Land Cover System состоит из 24 пунктов, для удобства типы земного покрова были сгруппированы в следующие категории: урбанизированные территории, пашни, мозаика пашни и пастбищ или лесов, пастбища, леса и водно-болотные угодья (ВБУ).

На первом этапе было подсчитано общее и среднемноголетнее количество ГТ по ячейкам регулярной сетки размером 0,1° (*рис. 1*, см. с. 152). Это позволило выявить техногенные источники тепла (например, факелы сжигания попутных газов при добыче нефтепродуктов, а также некоторые промышленные предприятия) в изучаемых регионах, поскольку они также фиксируются информационными продуктами горячих точек (Архипкин и др., 2007; Терехов, Муратова, 2006). В дальнейшем техногенные ГТ не учитывались при анализе. Повторяемость лет с пожарами в процентах определена суммированием количества лет с наличием ГТ в каждой ячейке и последующим делением этого числа на длительность периода исследований — 19 лет. С помощью оверлейных операций пересечения архиву ГТ были присвоены атрибуты слоёв типов подстилающей поверхности и административных границ регионов и муниципальных районов. Всего территория исследования включает 11 регионов, которые делятся на 285 муниципальных образований уровня районов или городских округов. Картографический слой административных границ приводится по данным веб-картографического проекта OpenStreetMap (data.nextgis.com). Дальнейшая обработка полученного массива данных выполнялась в программе MS Excel: произведено суммирование ГТ по регионам, районам, типам земного покрова, месяцам и годам детектирования очагов горения. Для каждого региона и муниципального района получены коэффициенты линейного тренда по методу наименьших квадратов и соответствующие коэффициенты корреляции.

Результаты и обсуждение

Максимальная повторяемость лет с ГТ характерна для речных долин (Волго-Ахтубинская пойма и дельта Волги, пойма и дельта Терека) и наиболее освоенных в сельскохозяйственном отношении районов Саратовской, Волгоградской, Оренбургской областей и Ставропольского края (см. *рис. 1*).

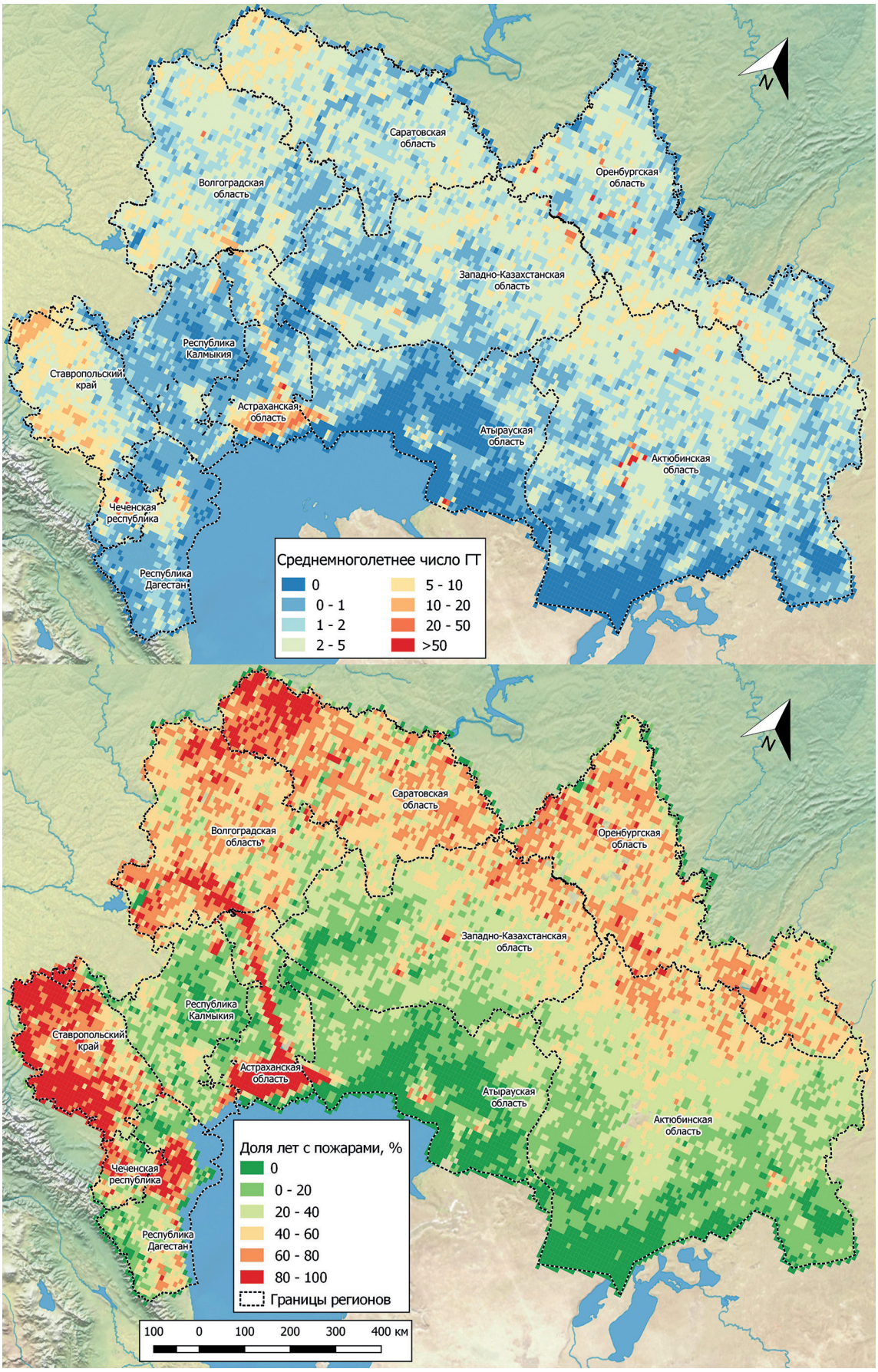

Рис. 1. Пространственное распределение среднемноголетнего количества очагов активного горения (*вверху*) и повторяемость лет с пожарами (*внизу*) в 2001–2019 гг.

Пространственные закономерности повторяемости природных пожаров на исследуемой территории соответствуют широтно-зональным особенностям природопользования и расселения (Павлейчик, 2019).

Для непокрытой лесом площади характерно снижение количества и площади ландшафтных пожаров (Лупян и др., 2017; Шинкаренко 2018; Шинкаренко, Берденгалиева, 2019). Число фиксируемых ГТ может значительно меняться из года в год, в среднем на исследуемой территории ежегодно фиксируется около 30 тыс. ГТ (2,5 ГТ на 100 км^2). В отдельные годы эта величина колеблется от 7 до 50 тыс. ГТ в год (от 0,6 до 4,7 ГТ на 100 км^2). При этом для разных типов земного покрова характерны разные темпы динамики количества и плотности ГТ (*табл. 1*, *рис. 2*, см. с. 154). В среднем по исследуемой территории скорость уменьшения плотности ГТ составляет –0,16 ГТ на 100 км^2 в год (площадь одной ГТ равна примерно 1 км^2, соответственно, плотность ГТ на 100 км^2 в год приблизительно характеризует горимость). Быстрее всего число зафиксированных ГТ снижается на пахотных землях и в мозаике пашни и пастбищ. Это может быть связано с увеличением посевных площадей за счёт вовлечения в оборот залежей, с внедрением технологий прямого посева, с введением противопожарного режима в летний период и с другими причинами. Также значимый отрицательный тренд характерен и для пастбищных земель, но с меньшим по модулю коэффициентом.

Таблица 1. Коэффициенты пропорциональности линейного тренда плотности ГТ на 100 км^2 по типам земного покрова в исследуемых регионах (числитель — коэффициент тренда, знаменатель — коэффициент корреляции линейного тренда, курсив — значимый тренд при $\alpha < 0{,}01$)

Регион	Тип земного покрова						
	Урбанизированные территории	Пашни	Мозаика пашни	Пастбища	Леса	ВБУ	Всего
Саратовская обл.	0,00	–0,20	–0,19	–0,19	–0,14	0,00	–0,18
	0,00	0,51	0,49	0,52	0,55	0,03	0,58
Оренбургская обл.	0,07	*–0,16*	*–0,24*	*–0,25*	*–0,26*	0,00	*–0,21*
	0,29	*0,62*	*0,60*	*0,62*	*0,63*	0,00	*0,62*
Волгоградская обл.	–0,06	*–0,25*	*–0,36*	*–0,25*	*–0,28*	*–0,05*	*–0,26*
	0,30	*0,76*	*0,75*	*0,71*	*0,62*	*0,59*	*0,77*
Астраханская обл.	0,06	–0,01	–0,04	–0,03	0,34	0,06	–0,02
	0,16	0,02	0,08	0,19	0,17	0,16	0,05
Калмыкия	–0,03	–0,07	–0,03	*–0,07*	0,03	–0,03	*–0,07*
	0,21	0,41	0,32	*0,63*	0,03	0,33	*0,59*
Ставропольский край	0,02	–0,26	–0,27	–0,06	*–0,32*	–0,09	–0,24
	0,06	0,55	0,51	0,34	*0,68*	0,48	0,54
Дагестан	0,02	0,05	0,02	0,03	0,11	–0,01	0,04
	0,13	0,28	0,18	0,34	0,26	0,02	0,27
Чечня	–0,22	*–0,27*	–0,45	–0,05	–0,11	–0,07	*–0,33*
	0,42	*0,61*	0,57	0,20	0,31	0,25	*0,60*
ЗКО	–0,05	*–0,28*	*–0,27*	*–0,16*	–0,27	–0,05	*–0,19*
	0,11	*0,67*	*0,74*	*0,58*	0,50	0,23	*0,67*
Актюбинская обл.	–0,02	*–0,31*	*–0,35*	–0,13	*–0,57*	–0,03	*–0,16*
	0,08	*0,61*	*0,70*	0,51	*0,73*	0,31	*0,58*
Атырауская обл.	0,00	0,02	–0,18	–0,03	2,19	0,06	–0,03
	0,02	0,05	0,28	0,29	0,42	0,24	0,26
Всего	–0,02	*–0,18*	*–0,25*	*–0,12*	–0,17	–0,01	*–0,16*
	0,10	*0,66*	*0,73*	*0,63*	0,56	0,13	*0,72*

Рис. 2. Динамика количества и плотности очагов горения по типам земного покрова (широкие столбцы — количество ГТ, узкие столбцы — плотность ГТ): *а* — Саратовская обл.; *б* — Оренбургская обл.; *в* — Волгоградская обл.; *г* — Астраханская обл.; *д* — Республика Калмыкия; *е* — Ставропольский край; *ж* — Дагестан; *и* — Чеченская Республика; *к* — Западно-Казахстанская обл.; *л* — Актюбинская обл.; *м* — Атырауская обл.; *н* — вся территория исследований

В этом случае сказывается рост поголовья скота (Кулик и др., 2016), а также неблагоприятные погодные флуктуации, в результате которых снижается продуктивность растительности. В отдельные влажные годы с большим количеством летних осадков горимость также снижается, но за счёт накопления растительной ветоши после благоприятного года горимость возрастает в последующие засушливые годы (например, после влажных 2013 и 2016 гг. в 2014–2015 и 2017 гг. количество ГТ существенно возросло). Высокая плотность ГТ в лесах Астраханской обл., скорее всего, связана с неправильным определением типа земного покрова продуктом USGS. Видимо, большая часть этой территории относится к водно-болотным угодьям, так как леса в регионе сосредоточены в Волго-Ахтубинской пойме.

Среди всех регионов наибольшая скорость снижения горимости отмечена в лесах Актюбинской обл. Доля лесов в этом регионе составляет всего 0,3 %, после 2010 г. лесные пожары в регионе практически прекратились. В целом по регионам максимальный коэффициент линейного тренда у Чеченской Республики, что связано с огромным числом ГТ зимой и весной 2001 г. во время проведения контртеррористической операции. В Волгоградской и Оренбургской областях значимые отрицательные тренды характеризуют динамику горимости практически всех типов земного покрова. В большинстве регионов отмечено существенное снижение среднемноголетнего количества и плотности ГТ после 2010–2011 гг. для всех типов земного покрова — в 2,5 раза, эта тенденция характеризует и динамику выгоревших площадей в естественных аридных ландшафтах (Шинкаренко, 2018; Шинкаренко, Берденгалиева, 2019). Только в Астраханской обл. нет явно выраженных изменений числа ГТ, что связано с преобладанием пожаров в пойменных и дельтовых ландшафтах Нижней Волги. Дагестан — единственный регион, где отмечен рост количества ГТ, пусть и незначительный — 10 ГТ в год (0,04 ГТ на 100 км^2 в год). Наиболее сильное снижение среднемноголетнего количества ГТ характерно для осенних месяцев (в октябре — в 4,9 раза, в сентябре — в 3,3 раза). В меньшей степени снизилось число ГТ весенних пожаров: в 1,5 раза в марте и в 2,1 раза в апреле.

Значимые тренды количества и плотности ГТ отмечены для 197 муниципальных образований (МО) из 285 (69 %), из них только у 27 положительные тренды. Наибольшие коэффициенты пропорциональности трендов динамики общего количества ГТ у МО с большей площадью, поэтому интерес представляет динамика плотности ГТ на 100 км^2 (*рис. 3*, см. с. 156). В Астраханской обл. отсутствуют МО с значимым трендом, в Чеченской Республике, Дагестане и Атырауской обл. их доля не превышает 40 %. Средний коэффициент пропорциональности значимых трендов плотности ГТ в МО изменяется от –0,036 до –0,006 ГТ на 100 км^2 в год в Атырауской и Саратовской областях соответственно. В целом можно констатировать преобладание земледельческих МО среди тех, что имеют значимые отрицательные тренды. В районах с преимущественно пастбищным природопользованием плотность ГТ снижается примерно на 0,1–0,2 ГТ на 100 км^2 в год. По данным исследования (Золотокрылин и др., 2016), после роста коэффициента увлажнения в последнем десятилетии XX в. в период 2005–2009 гг. наблюдалось наиболее сильное снижение увлажнения сухостепных и полупустынных пастбищ по сравнению с 2000–2004 гг. В 2010–2014 гг. наиболее сильно увлажнение уменьшилось в пустынных ландшафтах. В соответствии с гидротермическими условиями менялись и условия для возникновения и распространения ландшафтных пожаров. Также на рубеже XX и XXI вв. произошло снижение поголовья скота, что повлекло за собой накопление растительной ветоши на пастбищах, которая выгорала раз в 2–3 года (Дубинин и др., 2010; Кулик и др., 2018; Радочинская и др., 2019; Рябинина и др., 2018). К настоящему времени поголовье отгонного скота восстановилось до величин середины 90-х гг. прошлого века, что привело к увеличению нагрузок на пастбища и стравливанию большей части наземной фитомассы (Кулик и др., 2016; Рыбашлыкова и др., 2019). Кроме того, ухудшились условия увлажнения пустынных пастбищ (Золотокрылин и др., 2016). Из всех ландшафтов значимыми трендами снижения горимости характеризуются полупустынные, сухостепные и типичностепные. Для лесостепных и северопустынных ландшафтов коэффициент корреляции линейного тренда не превышает 0,5.

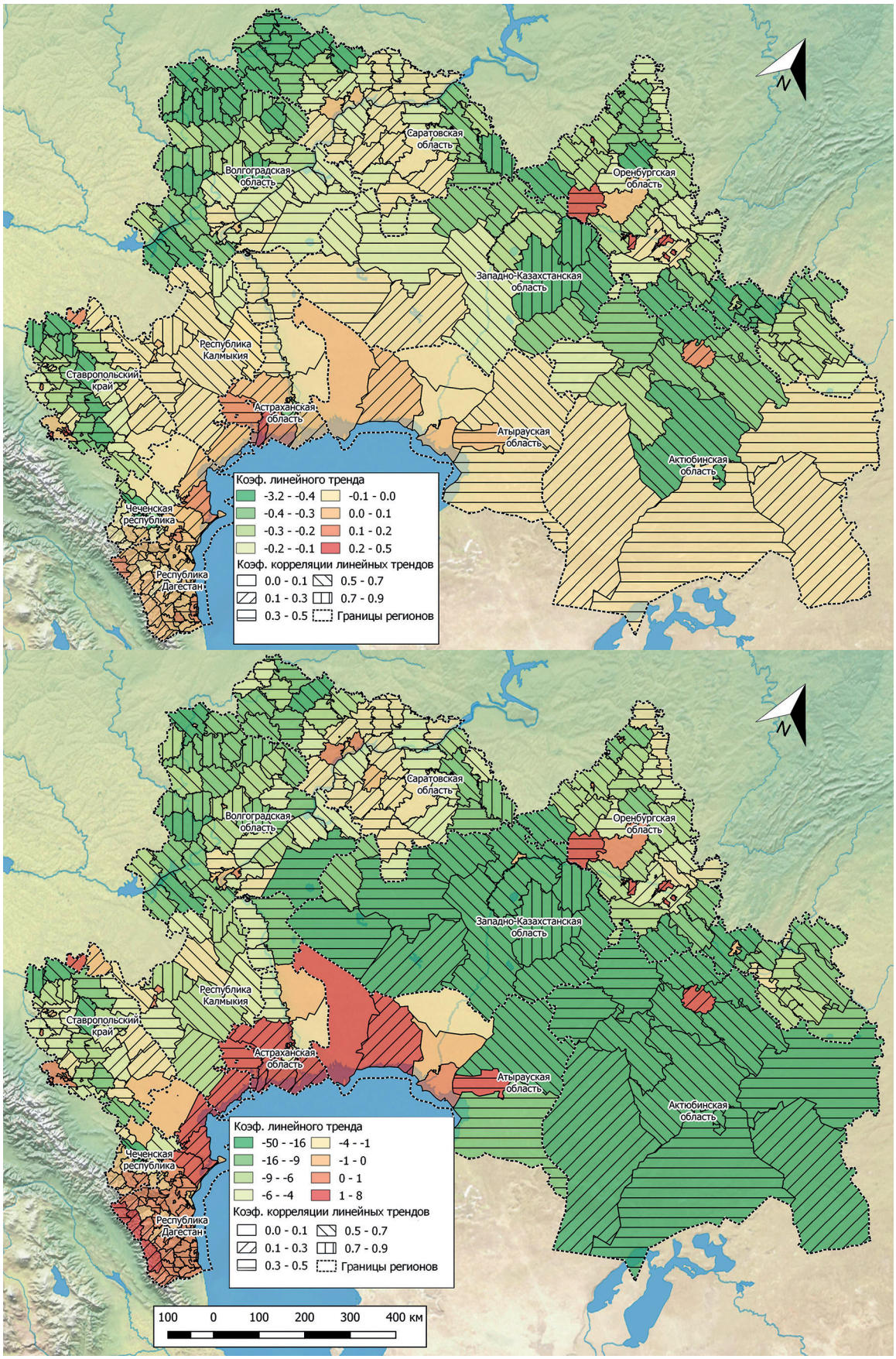

Рис. 3. Коэффициенты линейных трендов и соответствующие коэффициенты корреляции плотности на 100 км^2 (*вверху*) и количества (*внизу*) очагов активного горения по муниципальным районам за 2001–2019 гг. (статистически значимый тренд ($\alpha < 0{,}01$) при $r \geqslant 0{,}5$)

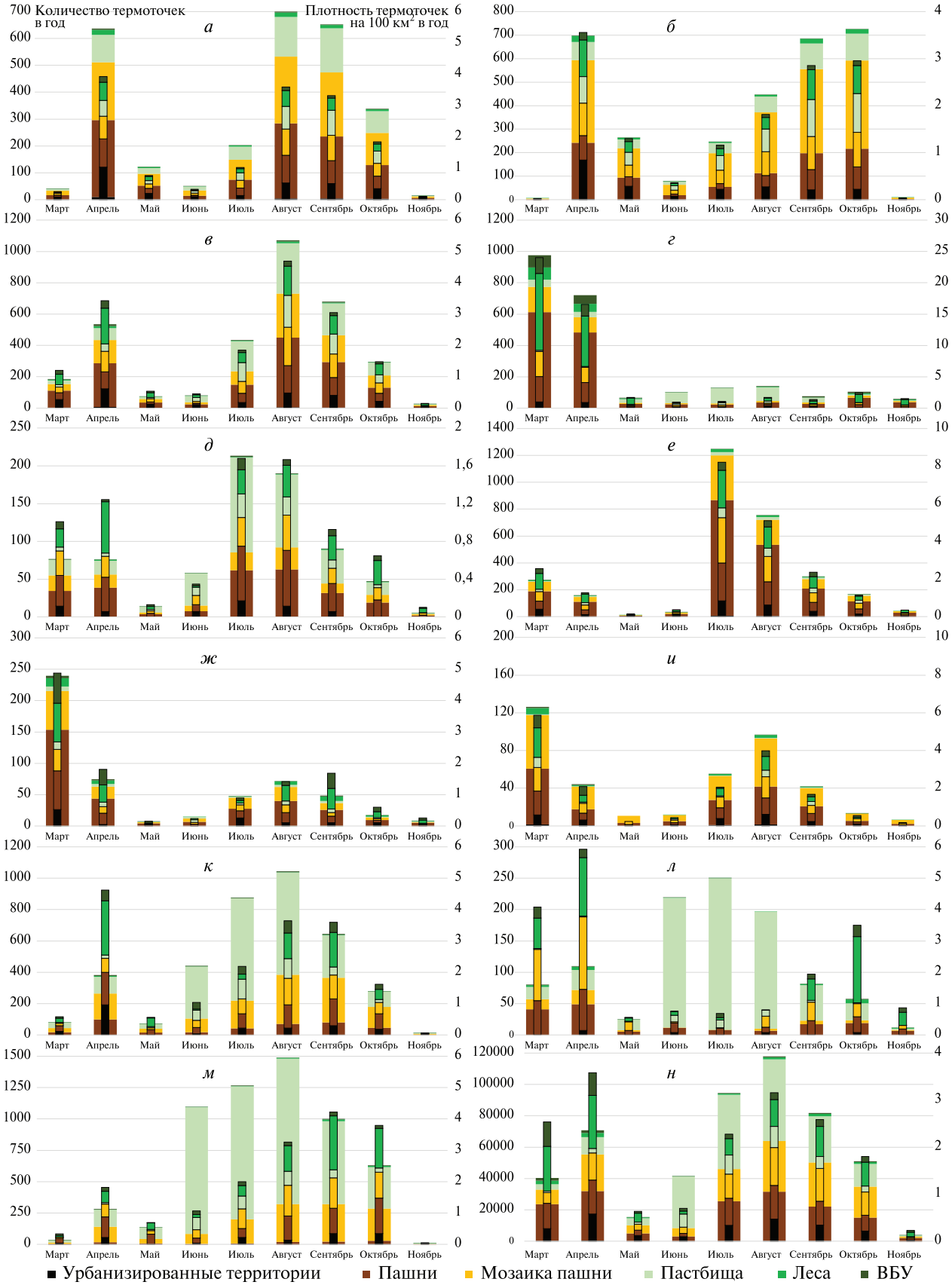

Рис. 4. Сезонная динамика количества и плотности очагов активного горения по типам земного покрова за 2001–2019 гг. (широкие столбцы — количество ГТ, узкие столбцы — плотность ГТ): *а* — Саратовская обл.; *б* — Оренбургская обл., *в* — Волгоградская обл.; *г* — Астраханская обл.; *д* — Республика Калмыкия; *е* — Ставропольский край; *ж* — Дагестан; *и* — Чеченская Республика; *к* — Западно-Казахстанская обл.; *л* — Актюбинская обл.; *м* — Атырауская обл.; *н* — вся территория исследований

Кроме многолетней динамики горимости безусловный интерес представляет её сезонная динамика (*табл. 2*, *рис. 4*, см. с. 157). Половина всех ГТ на исследуемой территории отмечается летом, остальная часть практически поровну распределена между весенними и осенними пожарами. Весенние палы характерны для пойменных ландшафтов (Дымова, 2015) и сельскохозяйственных земель (Hall et al., 2016). Для всех типов ландшафтов и административных единиц характерно незначительное количество ГТ в мае, так как на этот месяц приходится пик вегетации и растительные органы имеют высокую влажность. Кроме того, это период половодья на крупных реках, что влечёт низкую горимость (Шинкаренко, 2019а). В Астраханской обл. на весну приходится 70 % ГТ, в Дагестане — 56 % из-за тростниковых пожаров в пойменных и дельтовых ландшафтах Нижней Волги и Терека соответственно. Зональная естественная растительность выгорает в летний и осенний периоды, в это же время сжигают пожнивные остатки.

Таблица 2. Сезонное распределение ГТ, коэффициенты пропорциональности линейных трендов плотности ГТ на 100 км^2 (k) и коэффициенты корреляции трендов (r), курсив — значимый тренд при $\alpha < 0{,}01$

Регионы	Сезонное распределение ГТ								
	Весна			Лето			Осень		
	Доля, %	k	r	Доля, %	k	r	Доля, %	k	r
Саратовская обл.	29	–0,02	0,20	35	*–0,07*	*0,53*	36	–0,08	0,41
Оренбургская обл.	31	–0,06	0,38	24	0,00	0,01	45	*–0,15*	*0,53*
Волгоградская обл.	23	–0,03	0,25	47	*–0,16*	*0,77*	30	*–0,08*	*0,58*
Астраханская обл.	70	0,01	0,05	15	–0,02	0,20	10	–0,01	0,17
Калмыкия	22	–0,01	0,19	59	*–0,05*	*0,54*	18	–0,01	0,43
Ставропольский край	15	–0,01	0,14	67	*–0,23*	*0,56*	17	0,00	0,02
Дагестан	56	0,01	0,10	23	0,00	0,03	13	0,01	0,23
Чечня	42	–0,13	0,38	38	*–0,15*	*0,54*	14	–0,03	0,49
ЗКО	14	*–0,03*	*0,61*	62	–0,08	0,39	24	*–0,08*	*0,60*
Актюбинская обл.	8	*–0,01*	*0,50*	65	–0,07	0,38	28	*–0,07*	*0,61*
Атырауская обл.	21	0,00	0,09	64	–0,02	0,20	15	–0,01	0,44
Всего	24	–0,02	0,40	49	*–0,08*	*0,56*	26	*–0,06*	*0,62*

В разные годы сезонное распределение ГТ существенно различалось. Так, доля весенних, летних или осенних ГТ по всей исследуемой территории колеблется в среднем от 7–9 до 60–65 %. Только в Астраханской обл. по указанным выше причинам доля весенних ГТ не бывает ниже 40 %, а доля летних не превышает 35 %. Тенденция сезонной динамики плотности ГТ направлена на снижение плотности ГТ летних и осенних пожаров, только в Западно-Казахстанской и Актюбинской областях значимые отрицательные тренды горимости приходятся на весну. Достоверное снижение количества летних ГТ наблюдается в Саратовской, Волгоградской областях, Калмыкии, Чеченской Республике и Ставропольском крае. В Оренбургской, Волгоградской, Западно-Казахстанской и Атырауской областях существенно снижается плотность осенних ГТ.

С точки зрения типов земного покрова наиболее сильно уменьшается горимость мозаики пашни с другими типами в осенний период (на 0,12 ГТ на 100 км^2 в год). Далее следуют пашни, мозаика пашни, леса в летний период, затем пастбища и леса осенью. Для других сезонов и типов земного покрова значимые ($r > 0{,}5$, $\alpha < 0{,}01$) тренды отсутствуют.

В целом сезонное распределение ГТ по территории исследований соответствует широтно-зональным особенностям ландшафтов, природопользования и расселения (*рис. 5*, см. с. 159). Для северных районов преобладающими являются весенние палы в апреле,

а также сельскохозяйственные палы в августе и сентябре. По мере продвижения на юг в полупустынных и пустынных ландшафтах большая часть ГТ отмечена в июле и июне. Здесь выделяются районы с интразональными ландшафтами речных пойм, где наиболее часты ранневесенние пожары и большая часть ГТ приходится на март и апрель. Горячие точки на сельскохозяйственных землях в южных районах также отмечаются раньше, чем на севере из-за более раннего созревания культур на посевных площадях и их уборки.

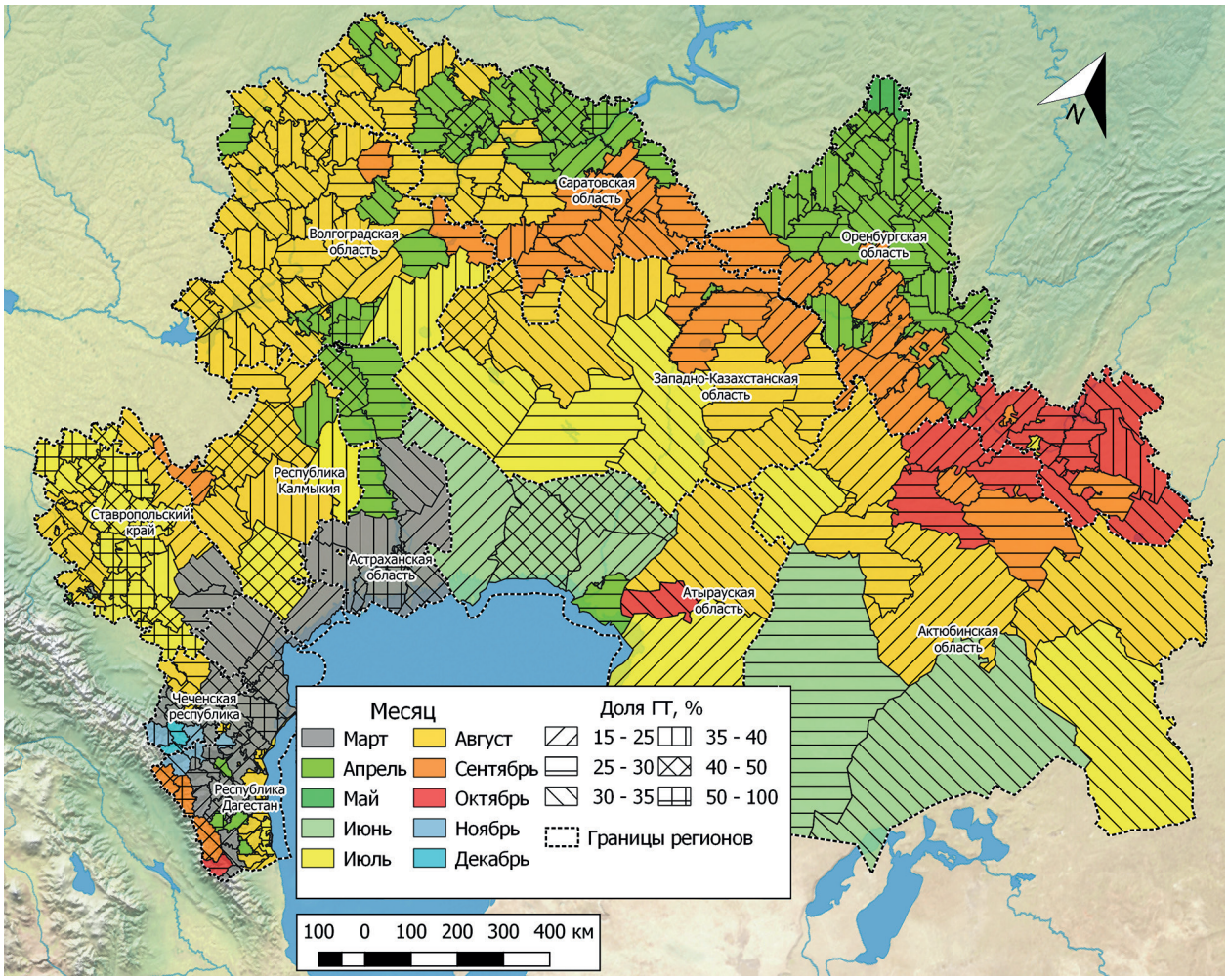

Рис. 5. Наиболее пожароопасные месяцы и доля ГТ в эти месяцы в муниципальных районах за 2001–2019 гг.

Заключение

В результате пространственного анализа распределения очагов активного горения были установлены техногенные источники тепловых аномалий, определена повторяемость лет с ГТ и выявлены пространственные и временные особенности распределения ГТ на территории России и Западного Казахстана. Для всех типов земного покрова характерны отрицательные тренды горимости. Быстрее всего число зафиксированных ГТ снижается на пахотных землях и в мозаике пашни и пастбищ. Это может быть связано с увеличением посевных площадей за счёт вовлечения в оборот залежей, с внедрением технологий прямого посева, с введением противопожарного режима в летний период и с другими причинами.

В большинстве регионов отмечено существенное снижение количества и плотности ГТ после 2010–2011 гг. для всех типов земного покрова — в 2,5 раза. Только в Астраханской обл. нет явно выраженных изменений числа ГТ, что связано с преобладанием пожаров в пойменных

и дельтовых ландшафтах Нижней Волги. Дагестан — единственный регион, где отмечен незначительный рост количества ГТ. Наиболее сильное снижение среднегодового количества ГТ характерно для осенних месяцев, в меньшей степени снизилось число ГТ весной.

В разные годы сезонное распределение ГТ существенно различалось. Так, доля ГТ по всей исследуемой территории, которая приходится на один из сезонов (весна, лето, осень), в отдельные годы колеблется в среднем от 7–9 до 60–65 %. Тенденция сезонной динамики плотности ГТ направлена на снижение плотности ГТ летних и осенних пожаров, только в Западно-Казахстанской и Актюбинской областях значимые отрицательные тренды горимости приходятся на весну.

В работе использовалась инфраструктура ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015). Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта № 19-35-60007.

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. Вып. 1. Т. 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.
5. *Дубинин М. Ю.*, *Лущекина А. А.*, *Раделоф Ф. К.* Оценка современной динамики пожаров в аридных экосистемах по материалам космической съемки (на примере Черных земель) // Аридные экосистемы. 2010. Т. 6. № 3. С. 5–16.
6. *Дымова Т. В.* Мониторинг природных пожаров на территории Астраханской области // Инженерно-строит. вестн. Прикаспия. 2015. № 3(13). С. 16–21.
7. *Золотокрылин А. Н.*, *Титкова Т. Б.*, *Черенкова Е. А.*, *Виноградова В. В.* Динамика летнего увлажнения и биофизических параметров аридных пастбищ Европейской части России в 2000–2014 гг. // Аридные экосистемы. 2016. Т. 22. № 1(66). С. 5–10.
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. географ. 2020. Т. 84. № 2. С. 207–217.
9. *Ильина В. Н.* Пирогенное воздействие на растительный покров // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2011. Т. 20. № 2. С. 4–30.
10. *Кулик К. Н.*, *Есмагулова Б. Ж.*, *Кошелева О. Ю.*, *Мушаева К. Б.*, *Шинкаренко С. С.* Изменение фитоценозов Волго-Уральского междуречья под влиянием пастбищных нагрузок // Вестн. Воронежского гос. ун-та. Сер. «География. Геоэкология». 2016. № 4. С. 25–32.
11. *Кулик К. Н.*, *Петров В. И.*, *Рулев А. С.*, *Кошелева О. Ю.*, *Шинкаренко С. С.* К 30-летию «Генеральной схемы по борьбе с опустыниванием Черных земель и Кизлярских пастбищ» // Аридные экосистемы. 2018. № 1. С. 5–12.
12. *Лупян Е. А.*, *Прошин А. А.*, *Бурцев М. А.*, *Балашов И. В.*, *Барталев С. А.*, *Ефремов В. Ю.*, *Кашницкий 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.
13. *Лупян Е. А.*, *Барталев С. А.*, *Балашов И. В.*, *Егоров В. А.*, *Ершов 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.

14. *Немков В. А.*, *Сапига Е. А.* Влияние пожаров на фауну наземных членистоногих заповедных степных экосистем // Экология. 2010. № 2. С. 141–147.
15. *Опарин М. Л.*, *Опарина О. С.* Влияние палов на динамику степной растительности // Поволжский эколог. журн. 2003. № 2. С. 158–171.
16. *Павлейчик В. М.* Широтно-зональная неоднородность развития травяных пожаров в Заволжско-Уральском регионе // Бюл. Оренбургского науч. центра УрО РАН. 2019. № 2. С. 1–14.
17. *Радочинская Л. П.*, *Кладиев А. К.*, *Рыбашлыкова Л. П.* Продукционный потенциал восстановленных пастбищ Северо-Западного Прикаспия // Аридные экосистемы. 2019. Т. 25. № 1. С. 61–68.
18. *Рыбашлыкова Л. П.*, *Беляев А. И.*, *Пугачёва А. М.* Мониторинг сукцессионных изменений пастбищных фитоценозов в «потухших» очагах дефляции Северо-Западного Прикаспия // Юг России: экология, развитие. 2019. Т. 14. № 4. С. 78–85.
19. *Рябинина Н. О.*, *Канищев С. Н.*, *Шинкаренко С. С.* Современное состояние и динамика степных геосистем юго-востока Русской равнины (на примере природных парков Волгоградской области) // Юг России: экология, развитие. 2018. № 1. С. 116–127.
20. *Терехов А. Г.*, *Муратова Н. Р.* Детектирование тепловых источников в Казахстанском секторе Каспийского региона по данным NOAA/AVHRR // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Вып. 3. Т. 1. С. 134–142.
21. *Украинский П. А.* Динамика спектральных свойств зарастающих травяных гарей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 229–238.
22. *Швиденко А. З.*, *Щепащенко Д. Г.* Климатические изменения и лесные пожары в России // Лесоведение. 2013. № 5. С. 50–61.
23. *Шинкаренко С. С.* Идентификация степных пожаров по данным Landsat и MODIS // Научно-агрон. журн. 2017. № 2. С. 32–34.
24. *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.
25. *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.
26. *Шинкаренко С. С.* (2019б) Пространственно-временная динамика опустынивания на Черных землях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 155–168.
27. *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.
28. *Giglio L.*, *Descloitres J.*, *Justice C. O.*, *Kaufman Y. J.* An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS // Remote Sensing of Environment. 2006. V. 87. P. 273–282.
29. *Giglio L.*, *Shroeder W.*, *Justice C. O.* The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 178. P. 31–41.
30. *Hall J. V.*, *Loboda T. V.*, *Giglio L.*, *McCarty G. W.* A MODIS-based burned area assessment for Russian croplands: Mapping requirements and challenges // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 184. P. 506–521.
31. *Hawbaker T. J.*, *Radeloff V. C.*, *Syphard A. D.*, *Zhu Z.*, *Stewart S. I.* Detection rates of the MODIS active fire product in the United States // Remote Sensing of Environment. 2008. V. 112(5). P. 2656–2664.
32. *Masocha M.*, *Dube T.*, *Mpofu N. T.*, *Chimunhu S.* Accuracy assessment of MODIS active fire products in southern African savannah woodlands // African J. Ecology. 2018. V. 56. Iss. 3. P. 563–571.
33. *Shinkarenko S. S.*, *Doroshenko V. V.*, *Berdengalieva A. N.* Fire regime of landscapes in the Volgograd region according to remote sensing data // Proc. IV Intern. Scientific and Practical Conf. “Anthropogenic Transformation of Geospace: Nature, Economy, Society” (ATG 2019). Ser.: Advances in Engineering Research. 2020. V. 191. P. 269–273.

Dynamics of arid landscapes burning in Russia and adjacent territories based on active fire data

S. S. Shinkarenko [1, 2, 3], V. V. Doroshenko [3], A. N. Berdengalieva [3], I. A. Komarova [3]

[1] *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*
[2] *Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Meliorations and Agroforestry RAS Volgograd 400062, Russia*
[3] *Volgograd State University, Volgograd 400062, Russia*
E-mail: shinkarenko@vfanc.ru

The paper presents the results of analysis of arid landscapes burning in the European part of Russia and the adjacent territories of Western Kazakhstan. Based on the years-long archive of detecting active fires (hot spots, thermal spots) for the period of 2001–2019, the paper outlines seasonal and long-term regularities of the dynamics of burning in the context of regions and types of land cover. At the first stage, technogenic sources of hot spots were identified and classified. Then, the archive of hot spots was grouped by regions and types of land cover. The highest density of hot spots is typical of the floodplain landscapes of river valleys and cultivated lands. A steady decrease in fire frequency of all categories of land has been observed since 2010–2011. A particularly strong decrease in the number and density of active fires is characteristic of arable lands. Half of all hot spots in the territory under study are recorded in summer, and the other half is almost equally distributed between spring and autumn. The reduction in fire frequency is mainly due to decrease in the number of summer and autumn fires. This is especially peculiar of arable lands with other types of land cover. The seasonal distribution of hot spots in the territory under study corresponds to latitudinal-zonal features of landscapes, nature management and settlement patterns: northern regions suffer from spring burns in April, as well as agricultural burns in August and September, while on semi-desert and desert pastures, most hot spots are recorded in June and July. The revealed regularities in landscapes burning will make it possible to more effectively organize fire-prevention measures, as well as serve as the basis for selection of satellite data for further visual identification of burned-out areas.

Keywords: landscape fires, MODIS, Northern Caspian, Caspian lowland, Western Kazakhstan, remote sensing, arid landscapes, south of Russia

Accepted: 30.01.2021
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-149-164

References

1. Arkhipkin O. P., Spivak L. F., Sagatdinova G. N., Pyatiletnii opyt operativnogo kosmicheskogo monitoringa pozharov v Kazakhstane (Five-year experience of operational space monitoring of fires in Kazakhstan), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2007, Vyp. 1, Vol. 4, pp. 103–110.
2. Bartalev S. A., Egorov V. A., Efremov V. Yu., Loupian E. A., Stytsenko F. V., Flitman E. V. (2012a), Otsenka ploshchadi pozharov na osnove kompleksirovaniya sputnikovykh dannykh razlichnogo prostranstvennogo razresheniya MODIS i Landsat-TM/ETM+ (Integrated burnt area assessment based on combine use of multi-resolution MODIS and Landsat-TM/ETM+ satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 9–26.
3. Bartalev S. A., Ershov D. V., Loupian E. A., Tolpin V. A. (2012b), Vozmozhnosti ispol'zovaniya sputnikovogo servisa VEGA dlya resheniya razlichnykh zadach monitoringa nazemnykh ekosistem (Possibilities of satellite service VEGA using for different tasks of land ecosystems monitiring), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 1, pp. 49–56.
4. Bartalev S. A., Stytsenko F. V., Khvostikov S. A., Loupian E. A., Metodologiya monitoringa i prognozirovaniya pirogennoi gibeli lesov na osnove dannykh sputnikovykh nablyudenii (Methodology of post-fire tree mortality monitoring and prediction using remote sensing data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 176–193.
5. Dubinin M. Yu., Lushchekina A. A., Radelof F. K., Otsenka sovremennoi dinamiki pozharov v aridnykh ekosistemakh po materialam kosmicheskoi s″emki (na primere Chernykh zemel') (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.

6. Dymova T. V., Monitoring prirodnykh pozharov na territorii Astrakhanskoi oblasti (Monitoring natural fires on the territory of Astrakhan region), *Inzhenerno-stroitel'nyi vestnik Prikaspiya*, 2015, No. 3(13), pp. 16–21.
7. Zolotokrylin A. N., Titkova T. B., Cherenkova E. A., Vinogradova V. V., Dinamika letnego uvlazhneniya i biofizicheskikh parametrov aridnykh pastbishch Evropeiskoi chasti Rossii v 2000–2014 gg. (Dynamics of Summer Moistening and Biophysical Parameters of Arid Pastures in the European Part of Russia in 2000–2014), *Aridnye ekosistemy*, 2016, Vol. 22, No. 1(66), pp. 5–10.
8. Zolotokrylin A. N., Cherenkova E. A., Titkova T. B., Aridizatsiya zasushlivykh zemel' evropeiskoi chasti Rossii i svyaz' s zasukhami (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.
9. Il'ina V. N., Pirogennoe vozdeistvie na rastitel'nyi pokrov (Impact of fires on the vegetation cover), *Samarskaya Luka: problemy regional'noi i global'noi ekologii*, 2011, Vol. 20, No. 2, pp. 4–30.
10. Kulik K. N., Esmagulova B. Zh., Kosheleva O. Yu., Mushaeva K. B., Shinkarenko S. S., Izmenenie fitotsenozov Volgo-Ural'skogo mezhdurech'ya pod vliyaniem pastbishchnykh nagruzok (Phytocenoses change of the area between Volga and Ural under the influence of grazing), *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Geografiya. Geoekologiya"*, 2016, No. 4, pp. 25–32.
11. Kulik K. N., Petrov V. I., Rulev A. S., Kosheleva O. Yu., Shinkarenko S. S., K 30-letiyu "General'noi skhemy po bor'be s opustynivaniem Chernykh zemel' i Kizlyarskikh pastbishch" (On the 30th Anniversary of the "General Plan to Combat Desertification of Black Lands and Kizlyar Pastures"), *Aridnye ecosystemy*, 2018, No. 1, pp. 1–6.
12. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskii A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Tsentr kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh IKI RAN dlya resheniya zadach izucheniya i monitoringa okruzhayushchei sredy (IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284.
13. 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., Sputnikovyi monitoring lesnykh pozharov v 21 veke na territorii Rossiiskoi Federatsii (tsifry i fakty po dannym detektirovaniya aktivnogo goreniya) (Satellite monitoring of forest fires in the 21st century in the territory of the Russian Federation (facts and figures based on active fires detection)), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 158–175.
14. Nemkov V. A., Sapiga E. A., Vliyanie pozharov na faunu nazemnykh chlenistonogikh zapovednykh stepnykh ekosistem (Impact of fires on the fauna of terrestrial arthropods in protected steppe ecosystems), *Ekologiya*, 2010, No. 2, pp. 141–147.
15. Oparin M. L., Oparina O. S., Vliyanie palov na dinamiku stepnoi rastitel'nosti (Influence of fires on dynamics of steppe vegetation), *Povolzhskii ekologicheskii zhurnal*, 2003, No. 2, pp. 158–171.
16. Pavleichik V. M., Shirotno-zonal'naya neodnorodnost' razvitiya travyanykh pozharov v Zavolzhsko-Ural'skom regione (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.
17. Radochinskaya L. P., Kladiev A. K., Rybashlykova L. P., Produktsionnyi potentsial vosstanovlennykh pastbishch Severo-Zapadnogo Prikaspiya (Production Potential of Restored Pastures of the Northwestern Caspian), *Aridnye ekosistemy*, 2019, Vol. 25, No. 1, pp. 61–68.
18. Rybashlykova L. P., Belyaev A. I., Pugacheva A. M., Monitoring suktsessionnykh izmenenii pastbishchnykh fitotsenozov v "potukhshikh" ochagakh deflyatsii Severo-Zapadnogo Prikaspiya (Monitoring Successional Changes in Pasture Phytocenoses in "Exhausted" Areas of Deflation in the North-West Caspian Region), *Yug Rossii: ekologiya, razvitie*, 2019, Vol. 14, No. 4, pp. 78–85.
19. Ryabinina N. O., Kanishchev S. N., Shinkarenko S. S., Sovremennoe sostoyanie i dinamika stepnykh geosistem yugo-vostoka Russkoi ravniny (na primere prirodnykh parkov Volgogradskoi oblasti) (The current state and dynamics of geosystems in the South-East of the Russian plain (by the example of the natural parks in Volgograd region)), *Yug Rossii: ekologiya, razvitie*, 2018, No. 1, pp. 116–127.
20. Terekhov A. G., Muratova N. R., Detektirovanie teplovykh istochnikov v Kazakhstanskom sektore Kaspiiskogo regiona po dannym NOAA/AVHRR (Detection of thermal sources in the Kazakhstan sector of the Caspian region according to NOAA/AVHRR), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmos*a, 2006, Vyp. 3, Vol. 1, pp. 134–142.
21. Ukrainskii P. A., Dinamika spektral'nykh svoistv zarastayushchikh travyanykh garei (Dynamics of the spectral properties of overgrown burned grass areas), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 4, pp. 229–238.
22. Shvidenko A. Z., Shchepashchenko D. G., Klimaticheskie izmeneniya i lesnye pozhary v Rossii (Climate Changes and Wildfires in Russia), *Lesovedenie*, 2013, No. 5, pp. 50–61.

23. Shinkarenko S. S., Identifikatsiya stepnykh pozharov po dannym Landsat i MODIS (Identification of steppe fires according to the data of Landsat and MODIS), *Nauchno-agronomicheskii zhurnal*, 2017, No. 2, pp. 32–34.
24. Shinkarenko S. S., Otsenka dinamiki ploshchadei stepnykh pozharov v Astrakhanskoi oblasti (Assessment of steppe burning dynamics in Astrakhan Region), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 1, pp. 138–146.
25. Shinkarenko S. S. (2019a), Pozharnyi rezhim landshaftov Severnogo Prikaspiya po dannym ochagov aktivnogo goreniya (Fire regime of North Caspian landscapes according to the data of active burning centres), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 1, pp. 121–133.
26. Shinkarenko S. S. (2019b), Prostranstvenno-vremennaya dinamika opustynivaniya na Chernykh zemlyakh (Spatial-temporal dynamics of desertification in Black Lands), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 155–168.
27. Shinkarenko S. S., Berdengalieva A. N., Analiz mnogoletnei dinamiki stepnykh pozharov v Volgogradskoi oblasti (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.
28. Giglio L., Descloitres J., Justice C. O., Kaufman Y. J., An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS, *Remote Sensing of Environment*, 2006, Vol. 87, pp. 273–282.
29. Giglio L., Shroeder W., Justice C. O., The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 178, pp. 31–41.
30. Hall J. V., Loboda T. V., Giglio L., McCarty G. W., A MODIS-based burned area assessment for Russian croplands: Mapping requirements and challenges, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 184, pp. 506–521.
31. Hawbaker T. J., Radeloff V. C., Syphard A. D., Zhu Z., Stewart S. I., Detection rates of the MODIS active fire product in the United States, *Remote Sensing of Environment*, 2008, Vol. 112(5), pp. 2656–2664.
32. Masocha M., Dube T., Mpofu N. T., Chimunhu S., Accuracy assessment of MODIS active fire products in southern African savannah woodlands, *African J. Ecology*, 2018, Vol. 56, Issue 3, pp. 563–571.
33. Shinkarenko S. S., Doroshenko V. V., Berdengalieva A. N., Fire regime of landscapes in the Volgograd region according to remote sensing data, *Proc. IV Intern. Scientific and Practical Conf. "Anthropogenic Transformation of Geospace: Nature*, *Economy*, *Society"* (*ATG 2019*), *Ser.: Advances in Engineering Research*, 2020, Vol. 191, pp. 269–273.