

Пространственно-временной анализ горимости пойменных ландшафтов Нижней Волги

С. С. Шинкаренко¹, С. А. Барталев¹, А. Н. Берденгалиева^{2,3}, Н. М. Иванов³

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: shrinkarenkos@vfanc.ru*

² *Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций
и защитного лесоразведения РАН, Волгоград, 400062, Россия*

³ *Волгоградский государственный университет, Волгоград, 400062, Россия*

Проблема природных пожаров очень актуальна для пойменных ландшафтов Нижней Волги. Эта территория имеет огромную ценность и включает в себя сеть особо охраняемых природных зон. Ежегодные пожары разрушают местообитания животных, приводят к задымлениям в населённых пунктах, а также выбросам в атмосферу парниковых газов. Территория исследований общей площадью около 2,2 млн га включает четыре гидролого-геоморфологических района: северную и центральную (среднюю) части Волго-Ахтубинской поймы, дельту Волги и ильменно-бугровой район. Для каждого из перечисленных районов определены пространственно-временные закономерности горимости по материалам экспертного дешифрирования данных Landsat. Всего за 2001–2020 гг. идентифицировано более 45 тыс. гарей. Доля пройденной огнём площади на территории пойменных ландшафтов за период исследований составила 58 %, из которых примерно половина горела три и более раз. В северной и центральной частях наблюдается снижение количества и площади пожаров, в дельтовой части, наоборот, отмечен их рост. Установлена связь между горимостью и гидрологическими условиями половодья. Чем раньше начинается и позже заканчивается половодье, выше его уровень, тем меньше количество пожаров и величины выгоревших площадей. Для дельтовой части эта связь сильнее, чем для северной и центральной частей Волго-Ахтубинской поймы. Тенденции гидрологических изменений последних десятилетий демонстрируют снижение уровня и продолжительности половодья, а обводнение дельты ухудшается из-за падения уровня Каспия. Поэтому в условиях сохранения настоящего уровня противопожарной профилактики можно ожидать дальнейшего роста горимости пойменных ландшафтов.

Ключевые слова: Нижняя Волга, природные пожары, дистанционное зондирование, Landsat, аридные экосистемы, пойма

Одобрена к печати: 09.12.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-143-157

Введение

Исследование масштабов и пространственно-временных особенностей воздействия пожаров на пойменные ландшафты засушливой зоны России и сопредельных территорий стало развитием ранее проведённого анализа горимости растительного покрова естественных зональных ландшафтов Астраханской и Волгоградской областей, Республики Калмыкии (Шинкаренко, 2018; Шинкаренко, Берденгалиева, 2019) с установлением общих закономерностей пирогенного воздействия на них по данным спутникового детектирования процессов горения (Шинкаренко, 2019; Шинкаренко и др., 2021б). Предварительный анализ распределения действовавших в разное время пожаров показал, что интразональные ландшафты Волго-Ахтубинской поймы (ВАП) и дельты Волги стали зоной наиболее частой их повторяемости. Например, более половины территории Астраханского заповедника, расположенного в дельте Волги, пройдено огнём три и более раз за последние 20 лет, а наибольшее количество пожаров за этот период на одном участке в охранной зоне заповедника составило 18 случаев (Шинкаренко и др., 2021в). Это связано со значительными запасами мортмассы тростника (*Phragmites australis*), рогоза (*Typha angustifolia*) и других околководных и луговых растений. Ежегодный прирост фитомассы тростника может составлять 5–7 т/га сухой массы (Бармин, Голуб, 2000), что сопоставимо с некоторыми типами лесов. Сгорание столь значительной

массы органического вещества приводит к выделению в атмосферу существенного объёма парниковых газов, а задымление создаёт угрозу здоровью населения.

Проблеме лесных пожаров и их мониторинга посвящено множество исследований (Барталев и др., 2012а; Лупян и др., 2017). В России для оперативного обнаружения и оценки последствий лесных пожаров уже много лет успешно функционирует система ИСДМ-Рослесхоз (Информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства) (Kotel'nikov et al., 2020). Пожары на нелесных землях, и в частности на территории водно-болотных экосистем, значительно менее исследованы (Дымова, 2019; Pavleichik, Chibilev, 2018; Vanderhoof et al., 2021). Существующие информационные продукты автоматизированного картографирования повреждённых огнём территорий нелесных ландшафтов отражают не более 40–60 % их реальной площади, но при этом часто содержат незатронутые пожарами, но ошибочно отнесённые к ним участки (Берденгалиева, Шинкаренко, 2020).

Особенностью участков уничтоженной пожарами растительности речных пойм и водно-болотных угодий становится их быстрое восстановление и заливание водой при половодье и паводках (Берденгалиева, Шинкаренко, 2020). При этом при картографировании таких га-рей по данным дистанционного зондирования необходимо учитывать их близость по спектральным характеристикам к водной поверхности и переувлажнённым почвам (Vanderhoof et al., 2021). Кроме того, более 80 % пожаров в Волго-Ахтубинской пойме и дельте Волги происходят в весенний период с повышенным уровнем облачности и, как следствие, со сниженной частотой оптических спутниковых наблюдений земной поверхности.

Оценка воздействия природных пожаров на пойменную растительность оказывается важным этапом ландшафтных исследований водно-болотных экосистем и открывает потенциальную возможность более точного определения объёмов эмиссии парниковых газов и других продуктов горения в атмосферу.

Цель настоящего исследования заключается в установлении закономерностей многолетней динамики горимости ландшафтов Волго-Ахтубинской поймы и дельты Волги на основе данных спутниковых систем Landsat и Sentinel-2, полученных в период 2001–2020 гг.

Объект исследования

Река Волга в нижнем течении (ниже Волгоградского гидроузла) течёт в своём естественном русле, образуя вместе с рукавом Ахтубой обширную пойму (*рис. 1*, см. с. 145). Перед впадением в Каспийское море Волга разделяется на множество протоков, образуя одну из самых многорукавных речных дельт (Коротаяев, 2011). В западной и восточной частях дельты расположены цепочки ильменей, разделённых бэровскими буграми, вытянутыми в субширотном направлении (Занозин и др., 2019; Шинкаренко и др., 2021а).

Площадь Волго-Ахтубинской поймы составляет около 0,6 млн га, площадь дельты — примерно 1,6 млн га (оценки различаются в зависимости от проводимой границы устьевого взморья Волги), в том числе 0,5 млн га ильменно-бугровых ландшафтов. Территория располагается в трёх субъектах России (Астраханская и Волгоградская области, Республика Калмыкия) и на западе Атырауской обл. Казахстана. В соответствии с особенностями рельефа и гидрологическими условиями территорию исследований разделяют на четыре относительно однородных гидролого-геоморфологических района (Kuzmina et al., 2018): 1 — от Волгоградского гидроузла до пос. Чёрный Яр; 2 — от пос. Чёрный Яр до с. Верхнелебяжье; 3 — дельта Волги; 4 — ильменно-бугровой район (см. *рис. 1*).

Первый район (северная часть ВАП) характеризуется самыми высокими отметками пойменных уровней и большим заглублением грунтовых вод, также только здесь расположены дубовые насаждения. Второй район (центральная или средняя часть ВАП) представлен обширными заливными лугами с насаждениями из ивы и тополя по гривам и прирусловым валам (Kuzmina et al., 2018). Дельта Волги подразделяется на несколько районов: верхний (при-вершинный), наиболее освоенный центральный (бугровой) и нижний (приморский), пред-

ставляющий практически сплошные заросли и острова из тростника (Занозин и др., 2019). Ильменно-бугровой район антропогенно зарегулирован, здесь отмечается деградация водоёмов из-за ухудшения обводнения вследствие падения уровня Каспия, а также снижения продолжительности и водности половодья (Шинкаренко и др., 2021a). Климатические и гидрологические изменения в бассейне Волги в совокупности с зарегулированием стока привели к снижению продолжительности и высоты половодья, что в итоге вызвало деградацию растительного и почвенного покрова поймы в нижнем течении (Golub et al., 2020; Kuzmina et al., 2018). Волго-Ахтубинская пойма и дельта Волги расположены в семиаридной зоне, где испаряемость превышает сумму осадков примерно в три раза. По этой причине состояние пойменных ландшафтов определяется преимущественно водностью половодья, а не гидротермическими условиями. При недостаточном обводнении процессы динамики состояния ландшафтов смещаются в сторону зональных. В последние десятилетия падение уровня Каспия также приводит к ухудшению обводнения дельты Волги из-за отсутствия подпора.

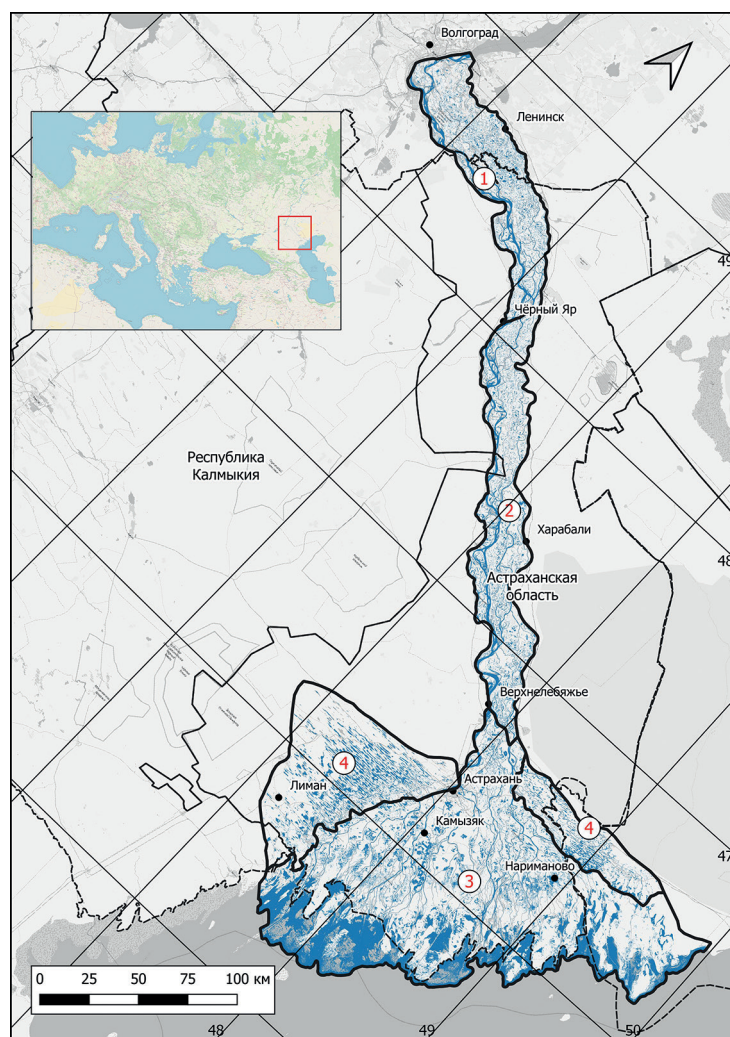


Рис. 1. Территория исследований; 1–4 — гидролого-геоморфологические районы

Практически вся исследуемая территория расположена на особо охраняемых землях. Это природный парк «Волго-Ахтубинская пойма» в Волгоградской обл., Природный парк Республики Калмыкия, а также природный парк «Волго-Ахтубинское междуречье», Астраханский заповедник, Ильменно-бугровой заказник в Астраханской обл. Пойменные ландшафты Нижней Волги — ключевая орнитологическая территория, водно-болотные угодья охраняются Рамсарской конвенцией (или Конвенцией о водно-болотных угодьях, *англ.*

Convention on Wetlands, 1971 г.). Из-за пожаров разрушаются места обитания птиц и других животных, ухудшаются условия для нереста рыб.

Среди причин пожаров к основным относят неосторожное обращение с огнём и умышленные поджоги растительности, часто рассматриваемые местными жителями в качестве способа повышения продуктивности сенокосов и пастбищ (Дымова, 2019). Антропогенный характер возгораний подтверждает факт существенного снижения горимости и частоты пожаров в Астраханском заповеднике, где запрещена хозяйственная деятельность (Шинкаренко и др., 2021в).

Материалы и методы

Картографирование участков сгоревшей растительности поймы основано на экспертном дешифрировании цветосинтезированных спутниковых изображений Landsat-5, -7, -8, Sentinel-2 и MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), полученных в каналах коротковолнового, ближнего инфракрасного и зелёного спектральных диапазонов. Данные Sentinel-2 приводились к разрешению 30 м, а изображения MODIS использовались в случае отсутствия безоблачных снимков более высокого пространственного разрешения. Поскольку пройденные огнём площади в весенний период могут быть залиты в половодье, а после него быстро восстанавливаются, то для их обнаружения необходимы спутниковые данные максимально высокого временного разрешения. В то время как для зональных ландшафтов характерно существенное изменение спектрально-отражательных характеристик, наблюдаемое в течение нескольких лет после пожара (Шинкаренко, 2021), гари в ландшафтах ВАП и дельты Волги восстанавливаются в течение сезона (Берденгалиева, Шинкаренко, 2020). При картографировании гарей не более 5–7 % их общей площади было выявлено по данным MODIS, остальные пройденные огнём участки были обнаружены и оконтурены по данным Landsat и Sentinel-2.

Гари обладают достаточно чёткими прямыми дешифровочными признаками. На цветосинтезированных изображениях пройденные огнём площади выделяются оранжево-коричневым цветом (*рис. 2*, см. с. 147). Для верификации использовались результаты детектирования активного горения в виде стандартных информационных продуктов MCD14ML, а также данные пройденных огнём площадей на основе продуктов MCD64A1 (Giglio et al., 2018) и FireCCI51 (Chuviesco et al., 2018). Ни один из указанных продуктов не обеспечивает полного выявления реально пройденной огнём площади, но в своей совокупности эти данные позволяют повысить точность дешифрирования и определить дату пожара. Поскольку очаги активного горения распределены неравномерно внутри контуров гарей, а ряд гарей не охвачен вообще, то основанные на объединении полученных данных продукты также не учитывают значительные площади пожаров.

Подобный подход уже применялся как авторами настоящего исследования (Шинкаренко, 2018; Шинкаренко, Берденгалиева, 2019; Шинкаренко и др., 2021в), так и другими коллективами (Pavleichik, Chibilev, 2018). Ранее на примере первого гидролого-геоморфологического района был проведён сравнительный анализ методом кросс-табуляции информационных продуктов MCD64A1, FireCCI51 и результатов экспертного дешифрирования за 2001–2019 гг. (Берденгалиева, Шинкаренко, 2020). Для продукта FireCCI точность производителя составила 33 %, точность пользователя — 31 %, для данных MCD64A1 — 13 и 12 % соответственно. Общая точность достигала 92 % за счёт больших негоревших площадей. Для обоих информационных продуктов характерны как пропуски гарей, так и ложное определение незатронутых огнём площадей как выгоревших. Так, по данным MCD64A1 к выгоревшим относились населённые пункты, а по данным FireCCI51 — залитые ранее в половодье участки поймы. Поскольку пойма заливается практически ежегодно, то подобных ошибок комиссии возникает достаточно много. Также были обнаружены артефакты обработки FireCCI51 на границе гранул MODIS h20v04 и h21v04 в разные годы. Пожары, примыкающие к границе, есть на одной из гранул, но при этом отсутствуют на другой, несмотря на то, что каких-либо преград для движения огня там нет.

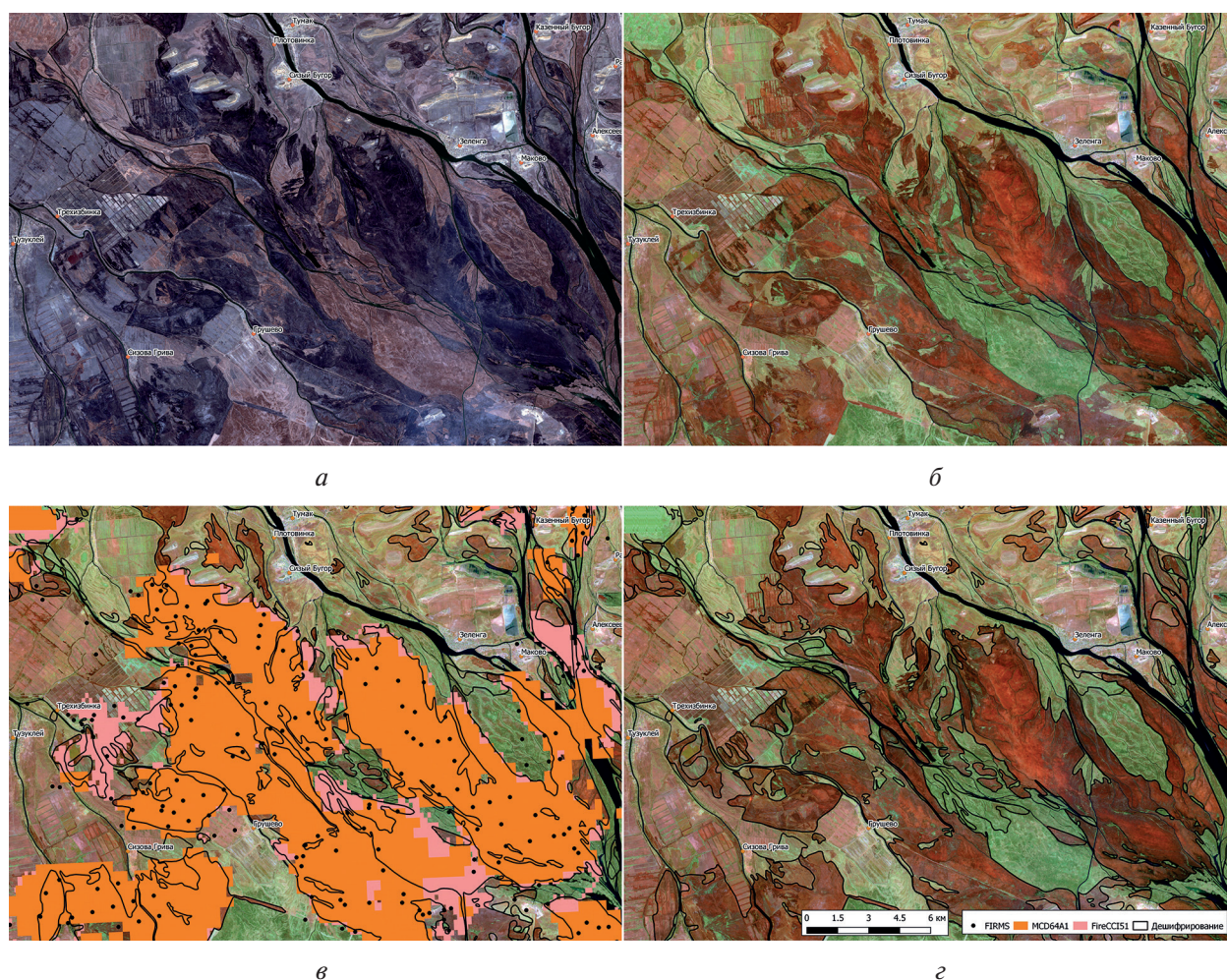


Рис. 2. Исходные данные на 19 марта 2019 г. и результат дешифрирования: а — RGB-синтез в комбинации спектральных каналов 4-3-2 Sentinel-2; б — комбинация 12-8-3 Sentinel-2; в — информационные продукты MCD14ML (чёрные точки), FireCCI (розовый цвет), MCD64A1 (оранжевый цвет); г — результат дешифрирования (чёрный контур)

При расчёте горимости учитывалась только покрытая растительностью площадь, а площадь открытого водного зеркала исключалась на основе результатов его выделения по индексу NDWI (англ. Normalized Difference Water Index — нормализованный разностный водный индекс) (Gao, 1996), полученному по данным Landsat на период летне-осенней межени. Пожары на сельскохозяйственных землях учитывались только в случае выхода огня на территорию прилегающих природных экосистем. Количество пожаров за весь период исследований (частота) рассчитывалось для сетки с размером ячейки 30 м: суммировалось количество пожаров, в контур которых попадает каждая ячейка сетки. Пожары разбиты на размерные классы, предложенные в работе (Валендик и др., 1979), только минимальная граница увеличена с 0,2 до 10 га, поскольку выделялись гари более 1–2 га. Для разделения больших по площади гарей на отдельные пожары использовались даты и время в атрибутивной информации данных детектирования активного горения. Также гари часто разделяются между собой дорогами, каналами, естественными водотоками и массивами орошаемых земель. Расходы воды в створе Волгоградского гидроузла, длительности половодья и периодов максимальных расходов воды, уровни половодий приведены согласно работам (Кривошей, 2015; Лобойко и др., 2018), а также информации официального сайта РусГидро (<http://www.rushydro.ru/hydrology/informer>) и Государственного водного реестра (<https://gis.favr.ru/web/guest/opendata>).

Результаты и обсуждение

Анализ спутниковых изображений позволил выявить и картографировать более 45 тыс. га-рей за период 2001–2020 гг. общей площадью (без учёта повторяемости) 5,02 млн га (рис. 3, 4, см. с. 149). По данным MCD64A1 вся площадь гарей составила 2,9 млн га, а по данным FireCCI51 — 4,5 млн га (в том числе на сельскохозяйственных землях). Большая часть всех выгоревших площадей сосредоточена в дельте Волги (72,1 % площади и 42 % количества га-рей). Около 48 % всех пожаров относятся к средним по площади (20–200 га), но на их долю приходится только 27 % всей выгоревшей территории. Более 40 % гарей представлены крупными пожарами (200–2000 га) и ещё 28 % — катастрофическими (более 2000 га).

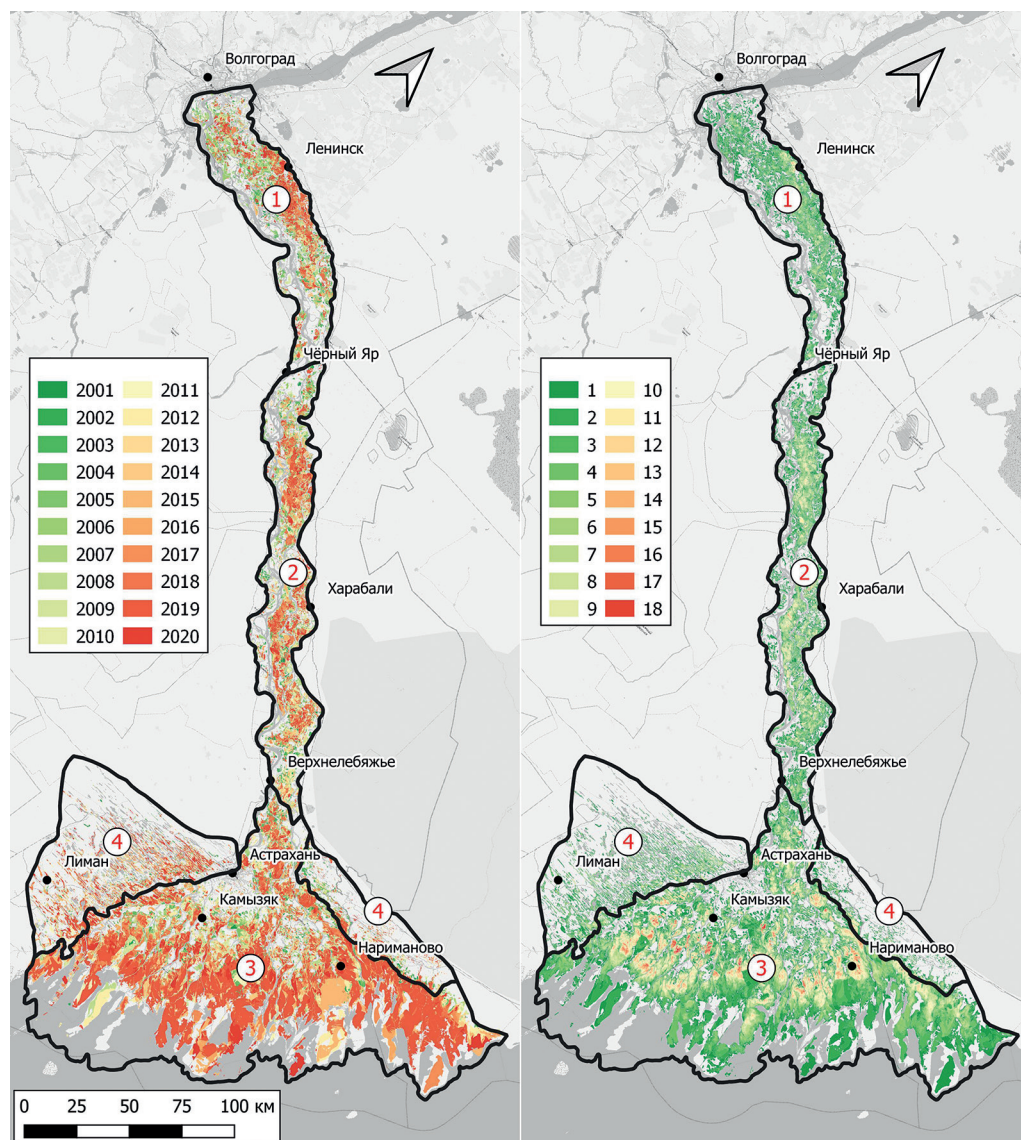


Рис. 3. Выгоревшая площадь (слева) и количество пожаров (справа) за 2001–2020 гг.; 1–4 — гидролого-геоморфологические районы

Из 301 пожара площадью более 2000 га 290 расположено в дельте Волги, среднегодовое выгоревшая площадь здесь составляет почти 180 тыс. га/год. Это связано с ландшафтными особенностями территории, поскольку мелководья в приморской части дельты сплошь покрыты зарослями тростника, для продвижения фронта пожара нет препятствий. В других гидролого-геоморфологических районах ландшафты более разнообразны: большое коли-

чество протоков, озёр, грунтовых дорог, гравистый рельеф препятствуют свободному распространению огня. В ильменно-бугровом районе заросли тростника вытянуты тонкими полосками вдоль водоёмов, а перемежающиеся с ильменями бэровские бугры покрыты малопродуктивной зональной растительностью, которая почти не горит из-за низкой сомкнутости. По этим причинам форма пожаров повторяет контуры околотовной растительности (Иванов и др., 2020).

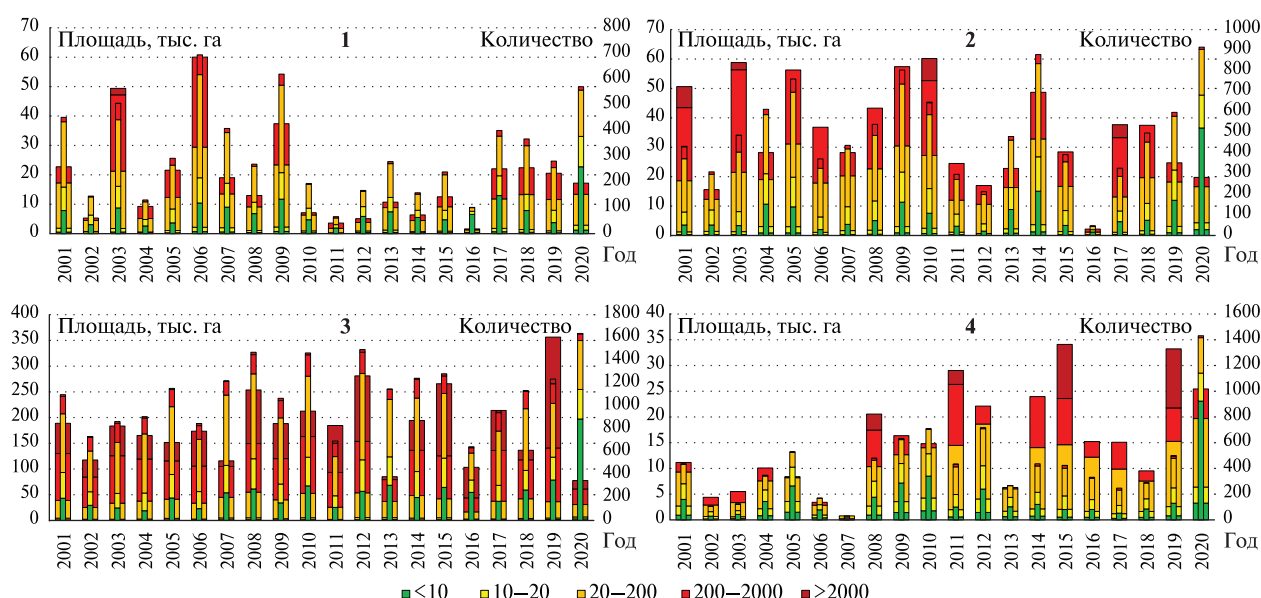


Рис. 4. Динамика площадей (широкие столбцы) и количества (узкие столбцы) пожаров разных размерных классов в 2001–2020 гг.; 1–4 — гидролого-геоморфологические районы

Всего в пойменных ландшафтах Нижней Волги ежегодно выгорает в среднем около 250 тыс. га, или 11 % территории, из которых 220 тыс. га приходится на весну, а 30 тыс. га — на летне-осенний период. Это соотношение в пойме и дельте Волги противоположно сезонному распределению пожаров в окружающих естественных зональных ландшафтах, где преобладают летние пожары (Шинкаренко и др., 2021б).

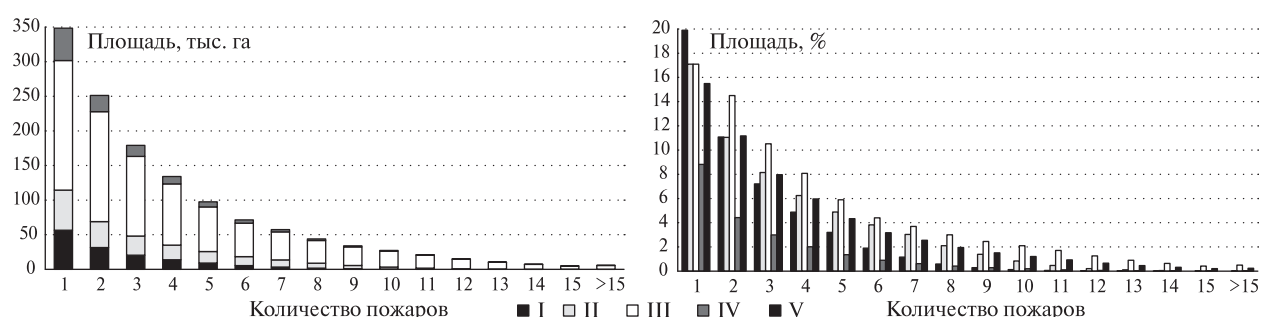


Рис. 5. Площади участков с разным количеством пожаров (слева) и их доля в территории исследования (справа); I–IV — 1–4-й гидролого-геоморфологические районы, V — вся территория исследований

За 2001–2020 гг. общая пройденная огнём площадь составила 1,3 млн га, или 58 % территории исследований (рис. 5). В первых двух гидролого-геоморфологических районах выгорело 50 и 60 % территории соответственно, в дельте Волги — 77 %, а в ландшафтах ильменно-бугрового района — 22 %. Примерно 73 % всех выгоревших площадей было пройдено огнём два и более раз, в том числе 23 % выгорало более пяти раз за период исследований. Рост повторяемости пожаров увеличивается с севера на юг, достигая максимума в районе границ

приморской и центральной частей дельты Волги. Очаги максимальной частоты пожаров свидетельствуют о приуроченности возгораний к определённым участкам. Примером могут служить окрестности Астраханского заповедника, где частота пожаров в 2–3 раза выше, чем в ядре этой особо охраняемой природной территории или на большом удалении от неё (Шинкаренко и др., 2021в). Это может говорить об умышленных поджогах растительности вблизи охранной зоны заповедника. Выявление участков с повышенной частотой пожаров очень важно для разработки и оптимизации мер профилактики, в том числе усиления контроля за соблюдением противопожарной безопасности.

В северной и центральной частях ВАП характерно существенное снижение количества и площадей пожаров после 2010 г. В первом гидролого-геоморфологическом районе в 2011–2020 гг. среднемноголетняя площадь пожаров сократилась вдвое, а количество пожаров — на треть. Данная тенденция характерна не только для севера ВАП, но и для всей Волгоградской обл. (Шинкаренко и др., 2021б).

Во втором гидролого-геоморфологическом районе площади и количество пожаров уменьшились: на 48 и 18 % соответственно. Здесь снизилось количество пожаров площадью более 10 га, но на 20 % выросло число относительно небольших пожаров площадью до 10 га. Возможными причинами снижения пройденной огнём площади при росте количества пожаров могут быть противопожарные мероприятия и своевременное реагирование на них силами и средствами основанного в 2013 г. природного парка Астраханской обл. «Волго-Ахтубинское междуречье». Также не исключены изменения растительного покрова при ухудшении условий обводнения — замещение высокопродуктивных луговых сообществ более ксерофитной растительностью с меньшей сомкнутостью и фитомассой, наиболее заметное в северной и центральной частях ВАП (Golub et al., 2020). В этом случае для возникновения и распространения пожаров требуется несколько лет для накопления критического объёма мортмассы (Шинкаренко, Берденгалиева, 2019).

В дельте Волги и подstepных ильменях отмечен рост площадей пожаров на 11 и 25 % при увеличении их количества на 2,3 и 9,5 % соответственно. В дельтовой части рост выгоревших площадей происходит главным образом за счёт увеличения доли катастрофических пожаров площадью более 2000 га: их количество выросло на 11 %, а площадь — на 34 %. В ильменно-бугровом районе также отмечен рост пройденной огнём площади и увеличение средней площади отдельных пожаров. Это может быть связано с уменьшением площади открытого водного зеркала и разрастанием околководной растительности (Шинкаренко и др., 2021а).

На состояние пойменных ландшафтов засушливой зоны в большей степени влияют гидрологические изменения, чем трансформация климатических условий (Solodovnikov, Shinkarenko, 2020). Видовой состав и продуктивность пойменной растительности связаны с уровнем и длительностью половодья (Kuzmina et al., 2018). Поскольку исследуемые ландшафты расположены в семиаридной зоне, здесь на протяжении большей части вегетационного сезона наблюдается сухая и тёплая пожароопасная погода. Горимость же в большей степени связана с состоянием и наличием горючего материала и источников огня. В пойменных ландшафтах дополнительным фактором возникновения и распространения огня выступает обводненность — уровень воды, который определяет площадь заливаний и длительность стояния воды на пойме. В рассмотренном в исследовании периоде особо выделяются 2006 и 2015 гг., отличающиеся высокой горимостью в летне-осенний период (рис. 6). Это связано с очень низкими максимальными расходами половодья, не превысившими 18 тыс. м³, что недостаточно для заливания большей части поймы. В 2019 г. максимальные расходы половодья были на среднемноголетнем уровне — 25 тыс. м³, но общая продолжительность половодья составила всего 18 дней. Это привело к катастрофическим пожарам в дельте Волги, когда выгорело более 30 % покрытой растительностью территории. Так же как недостаточная водность половодья увеличивает горимость, достаточное обводнение способно существенно уменьшить количество и площадь пожаров. Например, в 2020 г. выгорели наименьшие площади за весь период исследований. В этот год половодье началось намного раньше обычного и продолжалось 81 день, что стало рекордом за последние 20 лет. Также мог сказаться фактор снижения мортмассы из-за высокой горимости в 2019 г.

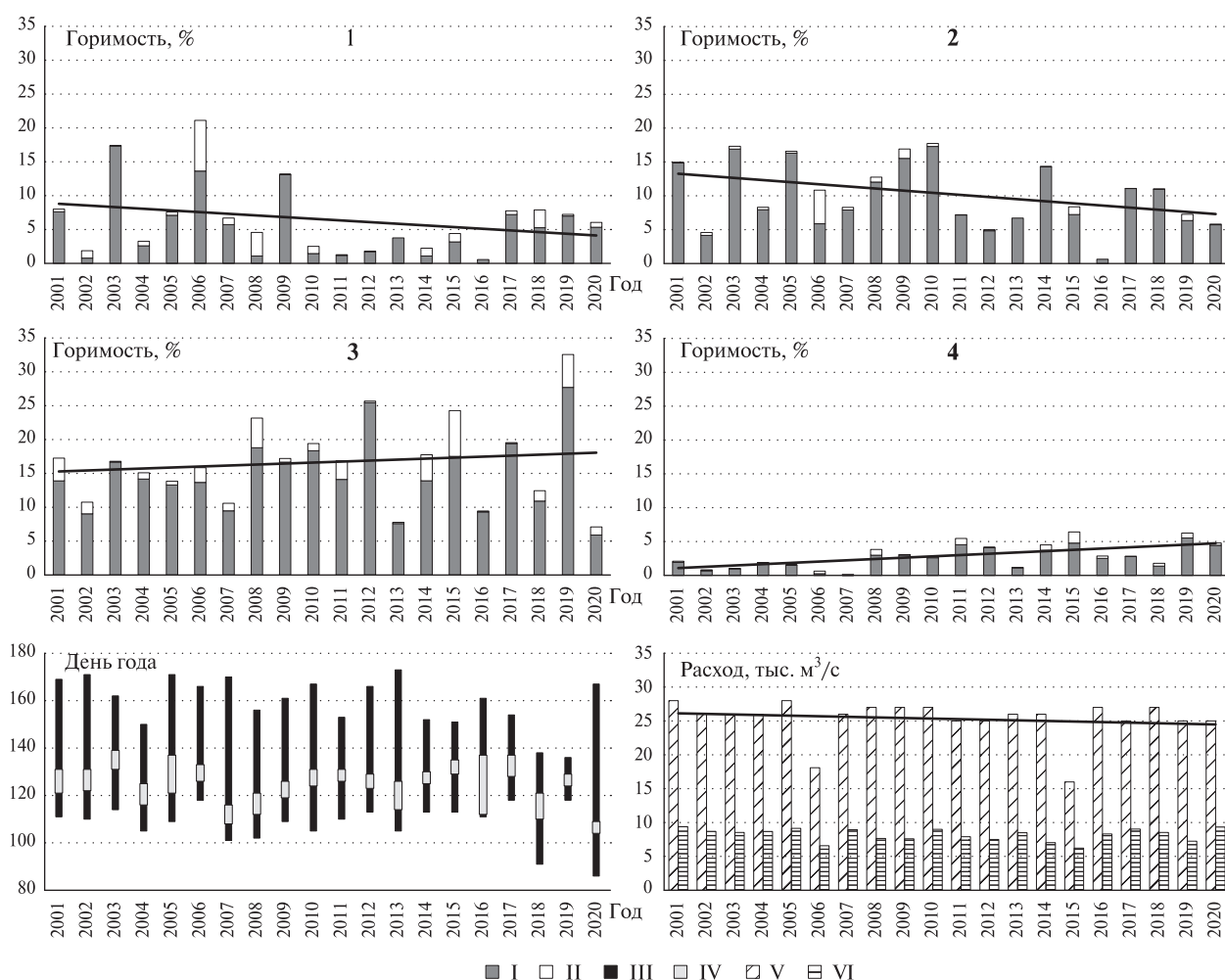


Рис. 6. Динамика горимости в летне-осенний (I) и весенний (II) периоды в 1–4-м гидролого-геоморфологических районах; динамика дат начала, окончания и продолжительности периодов половодья (III, внизу слева) и максимальных расходов (IV, внизу слева), величин максимальных расходов половодья (V, внизу справа) и среднегодовых расходов (VI, внизу справа) в створе Волгоградского гидроузла

Корреляционный анализ позволил установить связи между гидрологическими, гидротермическими условиями, количеством и площадью пожаров (таблица). Для весенних пожаров в северной и центральной части ВАП нет значимых коэффициентов корреляции. Для дельты Волги характерна высокая ($r = -0,7$) и умеренная ($r = -0,5...-0,6$) отрицательная связь с длительностью, максимальным уровнем и датой окончания половодья. Отмечена положительная связь ($r = 0,58$) с датой начала половодья. Таким образом, можно констатировать, что раннее, длительное и высокое половодье существенно снижает горимость в дельте Волги в весенний период, практически не влияя на пожарный режим в северной и центральной частях ВАП. Это может быть связано с более высокими отметками ступеней поймы в ВАП и, соответственно, более высокими уровнями половодья, которые требуются для их заливания. К моменту достижения необходимых отметок воды зелёная масса растительности уже достаточно развита, чтобы препятствовать горению. Значимой связи количества пожаров весной и гидрологических условий на территории исследований не выявлено.

В летне-осенний период в северной и центральной частях ВАП прослеживается связь горимости с гидрологическими условиями половодья: чем выше уровень половодья, тем ниже горимость. В дельтовой части кроме максимальных уровней и расходов половодья снижению горимости способствует и повышение водности в течение всего года. Причём наиболее сильно это влияние выражено в ильменно-бугровом районе. Длительное и высокое половодье способствует наполнению водой пойменных водоёмов, подпитке грунтовых вод и промачиванию

почв. Также из-за лучших условий обводнения увеличивается продолжительность вегетации луговых растений. На всей территории исследований в летне-осенний период также отмечено снижение площадей или количества пожаров с увеличением сумм осадков. Все эти факторы в совокупности снижают горимость. Высокие уровни половодья не только способствуют уменьшению пройденных огнём площадей во всех пойменных ландшафтах Нижней Волги, но также снижают и количество пожаров.

Коэффициенты корреляции величин выгоревших площадей,
количества пожаров, гидрологических и гидротермических условий

Показатели		Коэффициенты корреляции площади/количества пожаров			
		Гидролого-геоморфологические районы			
		1	2	3	4
<i>Весна</i>					
Половодье	Длительность	−0,08/0,12	0,01/0,10	−0,70/−0,15	−0,51/−0,07
	Максимальный расход	−0,14/0,04	0,36/0,35	−0,15/0,02	0,02/0,28
	Дата начала	0,24/−0,01	0,03/−0,3	0,58/0,02	0,31/0,01
	Дата окончания	0,08/0,15	0,04/−0,1	−0,46/−0,18	−0,43/−0,08
	Максимальный уровень	−0,17/0,22	0,29/0,30	−0,59/−0,11	−0,65/−0,25
Среднегодовой расход		0,02/0,12	0,27/0,11	−0,39/−0,20	−0,33/0,04
Средняя температура		−0,38/−0,21	−0,42/−0,22	0,37/−0,09	0,29/0,04
Сумма осадков		−0,29/−0,2	0,16/−0,32	0,18/−0,08	0,16/0,18
<i>Лето – осень</i>					
Половодье	Длительность	−0,05/0,03	−0,17/−0,2	−0,51/0,09	−0,33/−0,26
	Максимальный расход	−0,49/−0,54	−0,64/−0,7	−0,49/−0,02	−0,49/−0,51
	Дата начала	0,03/0,07	0,33/0,31	0,22/0,06	0,22/0,26
	Дата окончания	−0,04/0,09	0,04/−0,02	−0,50/0,16	−0,25/−0,13
	Максимальный уровень	−0,50/−0,53	−0,66/−0,89	−0,87/−0,89	−0,83/−0,89
Среднегодовой расход		−0,41/−0,40	−0,56/−0,66	−0,61/−0,02	−0,70/−0,53
Средняя температура		0,14/0,21	−0,02/0,05	−0,06/−0,19	−0,03/0,03
Сумма осадков		−0,41/−0,45	−0,35/−0,45	−0,61/−0,24	−0,64/−0,56

Примечание: значимые коэффициенты при $p > 0,95$ выделены курсивным начертанием.

Заключение

В результате анализа спутниковых изображений идентифицировано более 45 тыс. гарей за период 2001–2020 гг. в дельте Волги и ВАП. Среднемноголетняя горимость составила 11 % территории в год, при этом 9,9 % площади выгорает весной и только 1,2 % — летом и осенью. Большая часть выгоревшей площади расположена в дельте Волги.

За период исследований 58 % территории пойменных ландшафтов Нижней Волги было пройдено огнём, в половине случаев — три и более раз. Наиболее подверженные воздействию пожаров территории были пройдены огнём 19 раз за рассмотренный двадцатилетний период. Ландшафтные пожары становятся существенным фактором динамики пойменных экосистем наряду с гидрологическими условиями.

В северной части ВАП отмечено устойчивое снижение как количества, так и площадей пожаров в 2011–2020 гг. по сравнению с 2001–2010 гг. В центральной части ВАП также происходит уменьшение горимости, но растёт доля малых пожаров. Это может быть связано как

с усилением противопожарных мероприятий, так и с деградацией растительного покрова из-за снижения уровня обводнения поймы. В ландшафтах дельты Волги и ильменно-бугрового района отмечается рост горимости. При этом для дельты характерно увеличение числа и площадей как катастрофических пожаров (более 2000 га), так и малых (до 10 га). В ильменно-бугровых ландшафтах растёт число и площадь пожаров размерами до 2000 га.

Тенденции гидрологических изменений последних десятилетий в нижнем течении Волги характеризуются снижением водности и продолжительности половодья. Также из-за падения уровня Каспия опускаются и отметки водной поверхности в дельте Волги и ильменно-бугровом районе как в половодье, так и в период межени. Обсыхание пойменных ландшафтов неизбежно будет приводить к росту горимости. В пойменных ландшафтах Нижней Волги в среднем растительный покров ежегодно выгорает на площади почти 250 тыс. га. Поэтому необходимо совершенствование существующих методов мониторинга пожаров в условиях речных пойм в засушливой зоне, к которым относится и ВАП.

Разработанные карты и база данных пожаров могут служить опорной выборкой для создания более совершенных алгоритмов идентификации выгоревших площадей, а также проверки точности методами кросс-валидации различных информационных продуктов детектирования пожаров для пойменных ландшафтов. Полученные данные могут позволить оптимизировать противопожарную профилактику в регионе. Дальнейшие исследования будут направлены на оценку выбросов парниковых газов и других продуктов горения при пожарах в пойменных ландшафтах Нижней Волги.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 21-77-00018) с использованием инфраструктуры Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015) и возможностей информационного сервиса «Вега» (Барталев и др., 2012б).

Литература

1. Бармин А. Н., Голуб В. Б. Поучительный урок результатов эксплуатации тростниковых зарослей в дельте реки Волги // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2000. Т. 2. № 2. С. 295–299.
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. 9–27.
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. Берденгалиева А. Н., Шинкаренко С. С. Дешифрирование нелесных пожаров в условиях речных пойм // Научно-агроном. журн. 2020. № 4. С. 43–48. DOI: 10.34736/FNC.2020.111.4.008.43–48.
5. Валендик Э. Н., Матвеев П. М., Софронов М. А. Крупные лесные пожары. М.: Наука, 1979. 198 с.
6. Дымова Т. В. Основные и сопутствующие факторы воздействия на окружающую природную среду тростниковых пожаров // Астрахан. вестн. эколог. образования. 2019. № 2(50). С. 210–214.
7. Занозин В. В., Бармин А. Н., Шуваев Н. С., Колчин Е. А. Из истории природного районирования дельты Волги // Астрахан. вестн. эколог. образования. 2019. № 1(49). С. 120–131.
8. Иванов Н. М., Шинкаренко С. С., Зарбалиева Н. О. К. Особенности пожарного режима ильменно-бугровых ландшафтов дельты Волги // Научно-агроном. журн. 2020. № 4. С. 29–34. DOI: 10.34736/FNC.2020.111.4.006.29–34.
9. Коротчаев В. Н. Геоморфология дельты Волги и динамика русловых разветвлений // Вестн. Москов. гос. ун-та. Сер. 5: «География». 2011. № 2. С. 103–109.
10. Кривошей В. А. Река Волга (проблемы и решения). М.: ООО Журн. «РТ», 2015. 92 с.
11. Лобойко В. Ф., Овчарова А. Ю., Никитина Н. С. Особенности водного режима Нижней Волги и его влияние на состояние северо-западной части Волго-Ахтубинской поймы // Изв. Нижневолж. агроуниверситет. комплекса: наука и высшее образование. 2018. № 4(52). С. 89–96. DOI: 10.32786/2071-9485-2018-04-11.
12. Лупян 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., Сычуглов 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. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.
14. 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.
15. Шинкаренко С. С. 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.
16. Шинкаренко С. С. Изменение спектрально-отражательных характеристик зональных ландшафтов Северного Прикаспия при пирогенном воздействии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 192–206. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-192-206.
17. 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.
18. Шинкаренко С. С., Барталев С. А., Берденгалиева А. Н., Вытрицкий А. А. (2021а) Динамика площадей водоемов Западного ильменно-бугрового района дельты Волги // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 285–290. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-285-290.
19. Шинкаренко С. С., Дорошенко В. В., Берденгалиева А. Н., Комарова И. А. (2021б) 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.
20. Шинкаренко С. С., Иванов Н. М., Берденгалиева А. Н. (2021в) Пространственно-временная динамика выгоревших площадей на федеральных ООПТ юго-востока Европейской России // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2021. Т. 6. № 3. С. 23–44. DOI: 10.24189/ncr.2021.035.
21. Chuvieco E., Pettinari M. L., Lizundia-Loiola J., Storm T., Padilla Parellada M. ESA Fire Climate Change Initiative (Fire_cci): MODIS Fire_cci Burned Area Pixel product, version 5.1. Centre for Environmental Data Analysis. 2018. DOI: 10.5285/58f00d8814064b79a0c49662ad3af537.
22. Gao B. NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment. 1996. V. 58. No. 3. P. 257–266. DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
23. Giglio L., Boschetti L., David P. R., Humber M. L., Justice C. O. The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product // Remote Sensing of Environment. 2018. V. 217. P. 72–85. DOI: 10.1016/j.rse.2018.08.005.
24. Golub V. B., Chuvashov A. V., Bondareva V. V., Gerasimova K. A., Nikolaichuk L. F. Changes in the flora composition of the Volga–Akhtuba floodplain after regulation of the flow of Volga River // Arid Ecosystems. 2020. V. 10. No. 1. P. 44–51. DOI: 10.1134/S2079096120010047.
25. Kotelnikov R. V., Loupian E. A., Bartalev S. A., Ershov D. V. Space Monitoring of Forest Fires: History of the Creation and Development of ISDM-Rosleskhoz // Contemporary Problems of Ecology. 2020. V. 13. No. 7. P. 795–802. DOI: 10.1134/S1995425520070045.
26. Kuzmina Zh. V., Treshkin S. E., Shinkarenko S. S. Effects of River Control and Climate Changes on the Dynamics of the Terrestrial Ecosystems of the Lower Volga Region // Arid Ecosystems. 2018. V. 8. No. 4. P. 231–244. DOI: 10.1134/S2079096118040066.
27. Pavleichik V. M., Chibilev A. A. Steppe fires in conditions the regime of reserve and under changing anthropogenic impacts // Geography and Natural Resources. 2018. V. 39. No. 3. P. 212–221. DOI: 10.1134/S1875372818030046.
28. Solodovnikov D. A., Shinkarenko S. S. Present-Day Hydrological and Hydrogeological Regularities in the Formation of River Floodplains in the Middle Don Basin // Water Resources. 2020. V. 47. No. 6. P. 719–728. DOI: 10.1134/S0097807820060135.
29. Vanderhoof M. K., Hawbaker T. J., Teske C., Ku A., Noble J., Picotte J. Mapping Wetland Burned Area from Sentinel-2 across the Southeastern United States and Its Contributions Relative to Landsat-8 (2016–2019) // Fire. 2021. V. 4. No. 3. P. 52. <https://doi.org/10.3390/fire4030052>.

Spatio-temporal analysis of burnt area in the Lower Volga floodplain

S. S. Shinkarenko¹, S. A. Bartalev¹, A. N. Berdengalieva^{2,3}, N. M. Ivanov³

¹ Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: shinkarenkos@vfanc.ru

² Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Meliorations and Agroforestry RAS
Volgograd 400062, Russia

³ Volgograd State University, Volgograd 400062, Russia

The problem of wildfires is very urgent for the floodplain landscapes of the Lower Volga area. This area is of great value and includes a network of specially protected natural areas. Annual fires destroy the habitats of animals, lead to smoke coverage of settlements and to emissions of greenhouse gases into the atmosphere. The territory under study with a total area of about 2.2 million hectares includes four hydrological and geomorphological regions: the northern and central (middle) parts of the Volga-Akhtuba floodplain, the Volga delta and the ilmen-mound area. For each of the above areas, the spatio-temporal regularities of fire rate were determined on the basis of the materials of expert interpretation of Landsat data. Over 45 thousand fire sites were identified during the period of 2001–2020. The share of the area covered by fire on the territory of floodplain landscapes during the study period was 58 %, about half of which burned three or more times. In the northern and central parts, a decrease in the number and area of fires was observed. In the delta area, on the contrary, their growth was noted. We have established the interdependence between the fire rate and the hydrological conditions of seasonal floods. The earlier the flood begins and later ends, the higher its level and the less the number of fires and burned-out areas. In the delta area this interdependence is stronger than in the northern and central parts of the Volga-Akhtuba floodplain. Trends in hydrological changes in recent decades have shown a decrease in flood levels and duration, while delta flooding is worsening due to a drop in the Caspian Sea level. Therefore, in the conditions of maintaining the current level of fire prevention, we can expect a further increase in the incidence of fire in floodplain landscapes.

Keywords: Lower Volga, wildfires, remote sensing, Landsat, arid ecosystems, floodplain

Accepted: 09.12.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-143-157

References

1. Barmin A. N., Golub V. B., Instructive lesson of results of reed thickets operation in the Volga River delta, *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2000, Vol. 2, No. 2, P. 295–299 (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, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 9–27 (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, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 1, pp. 49–56 (in Russian).
4. Berdengalieva A. N., Shinkarenko S. S., Non-Forest Fires in River Floodplains Identification, *Nauchno-agronomicheskii zhurnal*, 2020, No. 4, pp. 43–48 (in Russian), DOI: 10.34736/FNC.2020.111.4.008.43-48.
5. Valendik E. N., Matveev P. M., Sofronov M. A., *Krupnye lesnye pozhary* (Large forest fires), Moscow: Nauka, 1979, 198 p. (in Russian).
6. Dymova T. V., Main and related factors impact on the environment of the reed fires, *Astrakhanskii vestnik ekologicheskogo obrazovaniya*, 2019, No. 2, pp. 210–214 (in Russian).
7. Zanozin V. V., Barmin A. N., Schyvaev N. S., Kolchin E. A., Hystory of natural zoning of The Volga River delta, *Astrakhanskii vestnik ekologicheskogo obrazovaniya*, 2019, No. 1(49), pp. 120–131 (in Russian).
8. Ivanov N. M., Shinkarenko S. S., Zarbalieva N. O. K., The fire regime features of The Volga delta hilly landscapes, *Nauchno-agronomicheskii zhurnal*, 2020, No. 4, pp. 29–34 (in Russian), DOI: 10.34736/FNC.2020.111.4.006.29-34.
9. Korotaev V. N., Geomorphology of the Volga River delta and changes of channel branches, *Vestnik Moskovskogo Unviersiteta, Ser. 5: Geografiya*, 2011, No. 2, pp. 103–109 (in Russian).

10. Krivoshei V.A., *Reka Volga (problemy i resheniya)* (The Volga River: Problems and Solutions), Moscow: Zhurnal "RT", 2015, 92 p. (in Russian).
11. Loboiko V.F., Ovcharova A.Yu., Nikitina N.S., Features of the water regime of the Lower Volga and its impact on the condition of the north-western part of the Volga-Akhtuba floodplain, *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee obrazovanie*, 2018, No. 4(52), pp. 89–96 (in Russian), DOI: 10.32786/2071-9485-2018-04-11.
12. 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, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284 (in Russian).
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., 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 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.
14. 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.
15. Shinkarenko S.S., 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 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-121-133.
16. Shinkarenko S.S., Changes in spectral reflectance characteristics of the Northern Caspian zonal landscapes under pyrogenic influence, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 3, pp. 192–206 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-192-206.
17. 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.
18. Shinkarenko S.S., Bartalev S.A., Berdengalieva A.N., Vypritskii A.A. (2021a), Dynamics of water bodies areas in the Western Ilmen Lake Region of the Volga Delta, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No 4, pp. 285–290 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-285-290.
19. Shinkarenko S.S., Doroshenko V.V., Berdengalieva A.N., Komarova I.A. (2021b), Dynamics of arid landscapes burning in Russia and adjacent territories based on 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.
20. Shinkarenko S.S., Ivanov N.M., Berdengalieva A.N. (2021c), Spatio-temporal dynamics of burnt areas in federal protected areas of South-East of the European Russia, *Nature Conservation Research*, 2021, Vol. 6, No. 3, pp. 23–44 (in Russian), DOI: 10.24189/ncr.2021.035.
21. Chuvieco E., Pettinari M.L., Lizundia-Loiola J., Storm T., Padilla Parellada M., *ESA Fire Climate Change Initiative (Fire_cci): MODIS Fire_cci Burned Area Pixel product, version 5.1*, Centre for Environmental Data Analysis, 2018, DOI: 10.5285/58f00d8814064b79a0c49662ad3af537.
22. Gao B., NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space, *Remote Sensing of Environment*, 1996, Vol. 58, No. 3, pp. 257–266, DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
23. Giglio L., Boschetti L., David P.R., Humber M.L., Justice C.O., The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product, *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 217, pp. 72–85, DOI: 10.1016/j.rse.2018.08.005.
24. Golub V.B., Chuvashov A.V., Bondareva V.V., Gerasimova K.A., Nikolaichuk L.F., Changes in the flora composition of the Volga–Akhtuba floodplain after regulation of the flow of Volga river, *Arid Ecosystems*, 2020, Vol. 10, No. 1, pp. 44–51, DOI: 10.1134/S2079096120010047.
25. Kotelnikov R.V., Loupian E.A., Bartalev S.A., Ershov D.V., Space Monitoring of Forest Fires: History of the Creation and Development of ISDM-Rosleskhoz, *Contemporary Problems of Ecology*, 2020, Vol. 13, No. 7, pp. 795–802, DOI: 10.1134/S1995425520070045.
26. Kuzmina Zh.V., Treshkin S.E., Shinkarenko S.S., Effects of River Control and Climate Changes on the Dynamics of the Terrestrial Ecosystems of the Lower Volga Region, *Arid Ecosystems*, 2018, Vol. 8, No. 4, pp. 231–244, DOI: 10.1134/S2079096118040066.
27. Pavleichik V.M., Chibilev A.A., Steppe fires in conditions the regime of reserve and under changing anthropogenic impacts, *Geography and Natural Resources*, 2018, Vol. 39, No. 3, pp. 212–221, DOI: 10.1134/S1875372818030046.

28. Solodovnikov D. A., Shinkarenko S. S., Present-Day Hydrological and Hydrogeological Regularities in the Formation of River Floodplains in the Middle Don Basin, *Water Resources*, 2020, Vol. 47, No. 6, pp. 719–728, DOI: 10.1134/S0097807820060135.
29. Vanderhoof M. K., Hawbaker T. J., Teske C., Ku A., Noble J., Picotte J., Mapping Wetland Burned Area from Sentinel-2 across the Southeastern United States and Its Contributions Relative to Landsat-8 (2016–2019), *Fire*, 2021, Vol. 4, No. 3, p. 52, <https://doi.org/10.3390/fire4030052>.