Спутниковые наблюдения задымлений от тростниковых пожаров на Нижней Волге

С.С. Шинкаренко^{1,2}, С.А. Барталев¹, А.Н. Берденгалиева²

¹ Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия ² Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, Волгоград, 400062, Россия E-mail: shinkarenkos@vfanc.ru

Проанализированы условия горения водно-болотных угодий в дельте Волги, установлены предпосылки рекордного задымления из-за тростниковых пожаров в октябре 2021 г. Пожар в восточной части дельты в Атырауской обл. Казахстана стал причиной возникновения дымового шлейфа протяжённостью около 700 км, который был зафиксирован метеостанцией в Волгограде. Данные MODIS и TROPOMI позволили идентифицировать задымление атмосферы, а также установить место пожара в окрестностях с. Курмангазы (Ганюшкино) на территории Атырауской обл. Ранее пожары с протяжёнными дымовыми шлейфами наблюдались только в 2015 и 2019 гг., которые отличались низким уровнем половодья и среднегодового расхода воды. Установлено, что наиболее интенсивное горение наблюдалось на переднем краю дельты Волги и в её восточной части в периоды низкого уровня воды при умеренном ветре скоростью до 5-6 м/с. Интенсивность горения в дельте Волги связана с гидрологическими условиями, особенно это выражено в летне-осенний период. Коэффициент корреляции нормализованного на площадь пикселя показателя Fire Radiative Power (FRP) составил -0,88 для суммарного FRP за год и -0,77 для среднего FRP на один очаг горения. Тенденция гидрологических изменений последних десятилетий в дельте Волги характеризуется снижением уровня воды вследствие падения уровня Каспия, что позволяет ожидать здесь интенсификации тростниковых пожаров.

Ключевые слова: Нижняя Волга, тростниковые пожары, дистанционное зондирование, MODIS, FRP

Одобрена к печати: 15.02.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-93-105

Проблема тростниковых пожаров и задымлений от них

Ландшафтные пожары — важный фактор динамики состояния экосистем, условий жизни населения, а также источники выбросов в атмосферу парниковых газов. В нашей стране огромное внимание уделяется проблеме лесных пожаров, в том числе вопросам их мониторинга (Барталев и др., 2017; Лупян и др., 2017, 2021). Ежегодно огонь проходит миллионы гектаров леса, а дым от лесных пожаров накрывает на порядок большие площади (Бондур, 2011; Chung, Le, 1984). В то же время в наземных экосистемах степной и пустынной зоны природные пожары стали регулярным явлением как в зональных, так и в интразональных пойменных ландшафтах (Дымова, 2019; Шинкаренко, 2018; Шинкаренко, Берденгалиева, 2019; Шинкаренко и др., 2021а, б, 2022; Pavleichik, Chibilev, 2020). Практически ежегодно отмечаются факты задымления городов юга России из-за сжигания пожнивных остатков в их окрестностях. При этом из-за небольшого объёма сгорающей биомассы задымление от травяных палов выражено намного меньше по сравнению с верховыми лесными и торфяными пожарами (Жаринов, Голубева, 2018). Исключением выступают тростниковые пожары в поймах и дельтах южных рек, например Волги в её нижнем течении.

Ежегодный прирост растительной массы тростниковых зарослей в дельте Волги может достигать 5–7 т/га сухого вещества (Бармин, Голуб, 2000). При многолетнем накоплении мортмассы могут происходить очень крупные пожары площадью 10–20 тыс. га и более (Шинкаренко и др., 2021б). Также нередко отмечаются ежегодные возгорания на одних и тех же участках с последующим восстановлением тростниковой растительности после весенних пожаров в течение вегетационного сезона (Берденгалиева, Шинкаренко, 2020). Как правило, в дельте Волги от задымлений воздуха страдают населённые пункты в радиусе 100—150 км от очага горения. Но в отдельных случаях складываются условия, когда дымовой шлейф распространяется на намного большие расстояния. Так, 11 октября 2021 г. наблюдался шлейф рекордной протяжённости почти в 700 км и площадью более 50 тыс. км²: от восточной части дельты Волги (с. Курмангазы (Ганюшкино) в Атырауской обл. Казахстана) до центральной части Ростовской обл. Дым был зафиксирован метеостанцией в Волгограде на расстоянии почти в 500 км от источника (*puc. 1*). Ранее дымовые шлейфы протяжённостью до 150—200 км фиксировались в сентябре – октябре 2015 и 2019 гг. (*puc. 2*, см. с. 95). При этом очаги горения были расположены также в восточной части дельты в Атырауской обл. или в авандельте.





Рис. 1. Спутниковые изображения дымовых шлейфов на Нижней Волге: *a* — MODIS Terra, 11.10.2021, 11:35; *б* — MODIS Aqua, 11.10.2021, 13:25; *в* — TROPOMI Sentinel 5p UV Aerosol Index, 11.10.2021, 12:35; *е* — TROPOMI Sentinel 5p концентрация СО (моль/м²), 11.10.2021, 12:35 (время UTC+3 (*англ.* Coordinated Universal Time, всемирное координированное время)). Красная линия — государственная граница РФ

За период 2001—2020 гг. в дельте Волги выгорело около 80 % территории, из которых почти половина горела три и более раз. Ежегодно здесь отмечается более тысячи пожаров средней площадью 150—200 га (Шинкаренко и др., 2022). Тем не менее дымовые шлейфы протяжённостью в несколько сотен километров наблюдаются редко.

Цель работы заключается в анализе условий многолетних и сезонных особенностей горения в дельте Волги и определении предпосылок развития пожара и возникновения протяжённого дымового шлейфа в октябре 2021 г. с использованием спутниковых изображений MODIS (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), TROPOMI (англ. TROPOspheric Monitoring Instrument), данных детектирования активного горения (тепловых аномалий) FIRMS (англ. The FireInformation for Resource Management System).





Рис. 2. Спутниковые изображения MODIS дымовых шлейфов на Нижней Волге: *a* — 22.09.2015; *б* — 04.10.2015; *в* — 14.09.2019; *г* — 31.10.2019. Красная линия — государственная граница РФ

Материалы и методы

Исследование основано на архиве данных детектирования активного горения по данным MODIS. Очаги активного горения охватывают пройденную огнём территорию лишь частично (Шинкаренко, 2019). По этой причине определение выгоревших площадей на каждую дату основывалось на создании полигонов Вороного вокруг каждого очага горения внутри границы пожара, которая была выделена визуально по данным Sentinel-2 и Landsat-7, -8. На основе атрибутивных данных очагов активного горения были получены значения FRP (*англ*. Fire radiative power) и величина разрешения пикселей MODIS и VIIRS (*англ*. Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) ("scan" и "track" — размеры пикселей в километрах по долготе и широте соответственно (Giglio et al., 2020)). Анализ тенденций многолетней и сезонной динамики выполнялся по данным MODIS (разрешение 1000 м), для анализа распространения пожара в 2021 г. использовались также данные VIIRS (разрешение 375 м). Сенсор MODIS имеет разрешение около 1 км в тепловых каналах при съёмке в надир, при отклонении от надира разрешение снижается (Sperling et al., 2020). Для компенсации влияния различных размеров пикселей на измерения величины FRP, а также для обеспечения сопоставимости этой величины по данным MODIS и VIIRS было проведено нормирование FRP на площадь пикселя с полу-

чением показателя FRPS (Lozin et al., 2021). Многолетняя динамика FRPS анализировалась по данным MODIS, тепловые аномалии VIIRS применялись только при анализе динамики пожара в октябре 2021 г.

Спутниковые изображения получены с помощью сервиса «Вега» (Барталев и др., 2012), данные о тепловых аномалиях загружены с сайта https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/. Сведения о скорости и направлении ветра по метеостанции «Астрахань» приводятся по данным сайта «Расписание погоды» (http://rp5.ru). Для каждого очага активного горения на основе атрибутов даты и времени был определён ближайший срок измерения скорости ветра, после чего скорость и направление ветра добавлялись в таблицу атрибутов.





Рис. 3. Схема распространения пожара в октябре 2021 г. (*a*): І — даты в октябре; ІІ — направление и скорость ветра, м/с; чёрные точки — очаги активного горения. Спутниковые изображения Sentinel-2 от 15.10.2021: RGB-синтез в комбинации спектральных каналов 4-3-2 (*b*); RGB-синтез в комбинации спектральных каналов 4-3-2 (*b*); RGB-синтез в комбинации спектральных каналов 12-8-3 (*b*) (R — *англ.* red, красный; G — *англ.* green, зелёный; B — *англ.* blue, синий)

б

в

Вся территория исследований расположена в радиусе 100–120 км от метеостанции. Возможная разница направления и скорости ветра, измеренных на метеостанции и непосредственно в месте пожара, вносит неопределённость в оценку связи FRPS и скорости ветра. Тем не менее визуальный анализ продвижения фронта пожара по разновременным спутниковым изображениям показал совпадения с направлением ветра по данным метеостанции. На *рис. 3* (см. с. 96) показаны стрелки направления и скорости ветра — по одной на каждый срок метеорологических наблюдений.

Расход воды в створе Волгоградского гидроузла, длительность и уровни половодья и периоды максимального расхода воды 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

Ежегодно в дельте Волги выгорает в среднем 180 тыс. га (15 %) территории, при этом 86 % всех случаев и 73 % площади гарей приходятся на весенние месяцы (Шинкаренко и др., 2021а, 2022). От задымления при ветрах южного и восточного румбов страдает г. Астрахань, расположенный ниже вершины дельты на 50 км, и населённые пункты непосредственно в дельте. Количество выделяемого дыма зависит от интенсивности горения, которая определяется состоянием горючего материала и внешними условиями.

Тростниковые заросли в дельте Волги представлены зелёной растительностью текущего года и запасом мортмассы, который может снижаться за счёт выгораний прошлых лет, а также вымывания в половодья. Также на горимость в дельте Волги существенно влияет гидрологический режим, так как значительная часть тростниковых зарослей расположена на отмелях авандельты. Увеличение уровней и продолжительности половодья, а также большие расходы воды в течение года способствуют значительному снижению горимости (Шинкаренко и др., 2022). При обсыхании участков, занятых тростниковой растительностью, во время низких уровней воды повышается уровень пожарной опасности. По данным Службы природопользования Астраханской обл. (https://nat.astrobl.ru/news), осенью 2021 г. в дельте Волги наблюдались самые низкие отметки уровня воды за последние десятилетия, что связано с маловодьем в бассейне Волги и падением уровня Каспия. Исследуемый пожар начался 2 октября и продолжался по 28 октября, покрыв площадь более 70 тыс. га (см. *рис. 3*) и став самым крупным как минимум за последние 20 лет (Шинкаренко и др., 2022).

Интенсивность пожара может быть выражена через мощность потока энергии излучения FRP, данные о которой содержатся в составе информационных продуктов детектирования очагов активного горения. Этот показатель широко используется при анализе ландшафтных пожаров и их последствий (Fu et al., 2020; Li et al., 2020; Lozin et al., 2020; Pereira et al., 2022; Ponomarev et al., 2020). В дельте Волги около 85 % фиксируемых очагов горения имеют FRPS до 50 MBT (*puc. 4*, см. с. 98), максимальное значение 1,7 тыс. МВт было зафиксировано 2 октября 2010 г. Наибольшее задымление отмечается при больших площадях пожаров и высокой интенсивности горения растительности с высокой долей вегетирующих побегов. Для большинства пожаров с интенсивным выделением дыма характерно наличие очагов горения с FRPS более 500–1000 MBT/км². Например, 9 октября 2021 г. были отмечены очаги с FRPS 670 MBT/км², а в сентябре 2019 г. — 1500–1600 MBT/км².

В весенние месяцы нередки пожары с FRPS более 1000 MBт, тем не менее в это время протяжённых дымовых шлейфов не возникает. В среднем в весенний период в дельте Волги интенсивность горения ниже, чем летом и осенью (см. *puc. 4*). Также отличается направление связи между скоростью ветра и FRPS: летом и осенью мощность горения максимальна при умеренном ветре со скоростью до 5-6 м/с, в то время как влияние ветра на FRPS весенних пожаров не выражено (*puc. 5*, см. с. 99). При усилении ветра FRPS пожаров летом и осенью резко снижается. Предположительно, это может быть связано с наличием зелёной растительности летом и в начале осени, для возгорания которой требуется большая температура и,

следовательно, относительно длительное горение ветоши, невозможное при быстром движении фронта пожара. При сильном ветре беглый огонь в меньшей степени повреждает зелёные побеги тростника, сгорает в основном мортмасса, выделяющая меньшее количество продуктов горения и водяного пара по сравнению с вегетирующей растительностью. Ранней весной вся растительная масса сухая, поэтому ветер способствует быстрому распространению фронта пожара.



Рис. 4. Многолетняя динамика количества очагов активного горения MODIS по диапазонам FRPS (*a*): широкие столбцы — весна, узкие — лето – осень; среднемноголетнее количество очагов активного горения MODIS по диапазонам FRPS и среднемноголетние значения FRPS по месяцам (*б*)

Горимость пойменных ландшафтов Нижней Волги, в том числе дельты, тесно связана с гидрологическими условиями. Установлено, что раннее, длительное и высокое половодье существенно снижает количество и площади пожаров не только в весенний период, но также летом и осенью (Шинкаренко и др., 2022). Величина FRPS пожаров также связана с гидрологическими условиями (*рис. 6*, см. с. 100). Коэффициент корреляции годовой суммы FRPS и среднего FRPS на один очаг активного горения со среднегодовыми расходами воды составил -0.73, а с максимальными уровнями половодья он равен -0.76. При этом влияние максимальных уровней половодья наиболее выражено именно в летне-осенний период (r = -0.88 для суммы FRPS и -0.77 для среднего значения), весной же связь с уровнем воды отсутствует.



Рис. 5. Связь FRPS и скорости ветра по данным MODIS за 2001–2021 гг. (*a*); динамика выгоревшей площади за сутки, среднесуточной скорости ветра и среднесуточного FRPS исследуемого пожара в октябре 2021 г. (*б*)

Наибольшие задымления отмечались в 2015, 2019 и 2021 гг., когда и максимальные уровни половодья, и среднегодовой расход имели наименьшие значения. Также эти годы характеризуются не только максимальными суммами FRPS, но и наибольшими значениями FRPS на один очаг активного горения: более 50 MBt/км². Это значение было достигнуто также осенью 2010 г., но общая сумма FRPS в тот год была намного ниже, что говорит о существенно меньшей площади горения. Это подтверждается и данными ранее опубликованных результатов исследований (Шинкаренко и др., 2022). То есть можно констатировать, что условия для формирования протяжённых на сотни километров дымовых шлейфов складываются только в период летне-осенней межени маловодных лет. Таким образом, гидрологические изменения последних лет, направленные на снижение уровней половодья (Kuzmina et al., 2018; Solodovnikov, Shinkarenko, 2020), потенциально способны приводить к интенсификации пожаров, в том числе в летне-осенний период.

В условиях авандельты затруднено тушение пожаров, поскольку здесь отсутствуют дороги, движение противопожарных судов осложняется плотными зарослями водной растительности и малыми глубинами. По этим причинам огонь может практически беспрепятственно продвигаться до каспийского взморья. Для оценки пространственного распределения очагов активного горения в дельте Волги использовался реализованный в программной среде QGIS метод тепловых карт (карт интенсивности), показывающих плотность наблюдаемых точек в радиусе 10 км (*puc.* 7, см. с. 101). Также использовалось взвешивание по значениям FRPS, в этом случае рассчитывалось не количество точек в радиусе 10 км, а сумма их FRPS. Очаги активного горения достаточно равномерно распределены по дельте. Карта со взвешиванием по показателю FRP наглядно иллюстрирует расположение участков наибольшей интенсивности горения: передний край дельты и её восточная часть в Казахстане. При этом большая часть летних очагов горения расположена именно в Атырауской обл. Казахстана. Причины повышенной горимости этого участка преимущественно в летний период требуют дополнительного изучения.



Рис. 6. Многолетняя динамика суммы и среднего значения FRPS на тепловую аномалию по данным MODIS за 2001–2021 гг. (*a*) (сплошные линии — сумма FRPS, пунктир — средние значения FRPS) и среднегодовых расходов в створе Волгоградского гидроузла и максимальных уровней по гидрологическому посту в Астрахани (б)

Дельты и поймы рек — территории наиболее интенсивных пожаров в степной и пустынной зоне (Шинкаренко и др., 2021а), из-за которых высвобождается большая масса продуктов горения, в том числе парниковых газов. Нарушаются места гнездования и зимовок множества птиц, ухудшаются условия для нереста рыбы. Из-за задымления загрязняется воздух в населённых пунктах. По этим причинам пожары на водно-болотных угодьях заслуживают внимание не меньше, чем в лесах и торфяниках. Необходимо совершенствование технологий идентификации выгоревших площадей в условиях пойменных ландшафтов, поскольку существующие автоматизированные алгоритмы выявления пройденных огнём участков не обеспечивают достаточной точности как из-за пропусков, так и из-за ложного детектирования (Берденгалиева, Шинкаренко, 2020).

Заключение

В результате исследований установлено, что в дельте Волги условия для интенсивного горения, необходимого для развития наиболее протяжённых дымовых шлейфов, складываются в период летне-осенней межени при умеренном ветре в маловодные годы (например, 2015,







Рис. 7. Тепловые карты среднемноголетнего количества очагов активного горения в 10-километровом радиусе (*слева*) и среднемноголетних сумм FRPS (MBT/км²) очагов активного горения в 10-километровом радиусе (*справа*) за 2001–2021 гг.: *а*, *б* — летние и осенние пожары: *в*, *е* — весенние пожары; *д*, *е* — все пожары

2019 и 2021 гг.). Также может сказываться фактор прогрева земной поверхности и приземного слоя воздуха в тёплое полугодие, необходимый для возникновения восходящих потоков воздуха, которые способствуют переносу дыма на большие расстояния.

Тенденции гидрологических изменений направлены на снижение уровня воды в дельте Волги из-за падения уровня Каспия, что будет периодически усугубляться при снижении расходов воды летней межени и половодье в Волге. Поэтому следует ожидать, что горимость ландшафтов дельты Волги будет увеличиваться: во-первых, из-за обсыхания, а во-вторых, без промывания в половодье будет накапливаться больше мортмассы.

Работа выполнена в рамках темы Института космических исследований РАН «Мониторинг» (госрегистрация № 122042500031-8), а также по темам научно-исследовательских работ Федерального научного центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН № 122020100311-3 и 122020100405-9 с использованием инфраструктуры Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015) и возможностей информационного сервиса «Вега» (Барталев и др., 2012).

Литература

- 1. *Бармин А. Н., Голуб В. Б.* Поучительный урок результатов эксплуатации тростниковых зарослей в дельте реки Волги // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2000. Т. 2. № 2. С. 295–299.
- 2. Барталев С.А., Ершов Д.В., Лупян Е.А., Толпин В.А. 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.
- 3. Барталев С.А., Стыценко Ф.В., Хвостиков С.А., Лупян Е.А. Методология мониторинга и прогнозирования пирогенной гибели лесов на основе данных спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 176–193. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-176-193.
- 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. *Бондур В. Г.* Космический мониторинг природных пожаров в России в условиях аномальной жары 2010 г. // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 3. С. 3–13.
- 6. *Дымова Т. В.* Основные и сопутствующие факторы воздействия на окружающую природную среду тростниковых пожаров // Астраханский вестн. эколог. образования. 2019. № 2(50). С. 210–214.
- 7. *Жаринов С. Н., Голубева Е. И.* Влияние лесных пожаров на показатели смертности населения Тверской области // Изв. Российской акад. наук. Сер. Географ. 2018. № 4. С. 96–103. DOI: 10.1134/S2587556618040179.
- 8. Кривошей В.А. Река Волга (проблемы и решения). М.: ООО «Журнал «РТ», 2015. 92 с.
- 9. 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. Нижневолжского агроуниверситет. комплекса: наука и высшее образование. 2018. № 4(52). С. 89–96. DOI: 10.32786/2071-9485-2018-04-11.
- 10. 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.
- 11. 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.
- Лупян Е.А., Стыценко Ф. В., Сенько К. С., Балашов К. С., Мазуров А.А. Оценка площадей пожаров на основе детектирования активного горения с использованием данных шестой коллекции приборов MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 15. № 4. С. 178–192. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-178-192.
- 13. 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.
- 14. 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.

- 15. 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.
- 16. Шинкаренко С. С., Дорошенко В. В., Берденгалиева А. Н., Комарова И. А. (2021а) 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.
- 17. Шинкаренко С. С., Иванов Н. М., Берденгалиева А. Н. (2021б) 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.
- 18. Шинкаренко С. С., Барталев С.А., Берденгалиева А. Н., Иванов Н. М. Пространственновременной анализ горимости пойменных ландшафтов Нижней Волги // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 143–157. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-143-157.
- 19. *Chung Y.S., Le H.V.* Detection of forest-fire smoke plumes by satellite imagery // Atmospheric Environment. 1984. V. 18. No. 10. P. 2143–2151. DOI: 10.1016/0004-6981(84)90201-4.
- Fu Y., Li R., Wang X., Bergeron Y., Valeria O., Chavardes R. D., Wang Y., Hu J. Fire Detection and Fire Radiative Power in Forests and Low-Biomass Lands in Northeast Asia: MODIS versus VIIRS Fire Products // Remote Sensing. 2020. V. 12. No. 18. Art. No. 2870. DOI: 10.3390/rs12182870.
- 21. *Giglio L., Loboda T., Roy D. P., Quale B., Justice C. O.* An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor // Remote Sensing of Environment. 2020. V. 113. P. 408–420. DOI: 10.1016/j. rse.2008.10.006.
- 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.
- Li F., Zhang X., Kondragunta S. Biomass Burning in Africa: An Investigation of Fire Radiative Power Missed by MODIS Using the 375 m VIIRS Active Fire Product // Remote Sensing. 2020. V. 12. No. 10. Art. No. 1561. DOI: 10.3390/rs12101561.
- 24. *Lozin D. V., Balashov I. V., Loupian E. A.* Possibilities of near real-time forest cover damage estimation based on fires radiative power data // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021. V. 806. 012019. DOI: 10.1088/1755-1315/806/1/012019.
- 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.
- Pereira G., Longo K. M., Freitas S. R., Mataveli G., Oliveira V.J., Santos P. R., Rodrigues L. F., Cardozo F.S. Improving the South America wildfires smoke estimates: Integration of polar-orbiting and geostationary satellite fire products in the Brazilian biomass burning emission model (3BEM) // Atmospheric Environment. 2022. V. 273. Art. No. 118954. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2022.118954.
- 27. *Ponomarev E. I., Litvintsev K. Yu., Ponomareva T. V., Shevtsov E. G., Yakimov N. D.* Satellite monitoring of the wildfire in Siberia and fire emissions estimation // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2020. V. 17. No. 6. P. 45–50. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-6-45-50.
- 28. *Sperling S., Wooster M. J., Malamud B. D.*, Influence of Satellite Sensor Pixel Size and Overpass Time on Undercounting of Cerrado/Savannah Landscape-Scale Fire Radiative Power (FRP): An Assessment Using the MODIS Airborne Simulator // Fire. 2020. V. 3. No. 2. P. 11. DOI:10.3390/fire3020011.
- 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.

Satellite observations of reed fire smoke on the Lower Volga

S. S. Shinkarenko^{1,2}, S.A. Bartalev¹, A.N. Berdengalieva²

 ¹ Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
² Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Meliorations and Agroforestry RAS Volgograd 400062, Russia E-mail: shinkarenkos@vfanc.ru

The article analyzes the conditions of burning wetlands in the Volga Delta and establishes the prerequisites for a record smoke from reed fires in October 2021. A fire in the eastern part of the delta in the Atyrau Region of Kazakhstan caused a smoke plume about 700 km long, recorded by a weather station In Volgograd. MODIS and TROPOMI data made it possible to identify atmospheric smoke and establish the location of the fire in the vicinity of the village of Kurmangazy (Ganyushkino) in the Atyrau Region. Previously, fires with extended smoke plumes were observed only in 2015 and 2019, characterized by low flood levels and average annual water discharges. The most intense burning was observed on the front edge of the Volga Delta and in its eastern part during low water levels with moderate wind speeds up to 5–6 m/s. The burning intensity in the Volga Delta is associated with hydrological conditions especially pronounced in the summer-autumn period. The correlation coefficient of the Fire Radiative Power (FRP) normalized to the pixel area was -0.88 for the total FRP for the year and -0.77 for the average FRP per fire. The trends of hydrological changes in recent decades in the Volga Delta are characterized by a decrease in water levels due to a drop in the level of the Caspian Sea, which allows us to expect an intensification of reed fires here.

Keywords: Lower Volga, reed fire, remote sensing, MODIS, FRP

Accepted: 15.02.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-93-105

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, pp. 295–299 (in Russian).
- Bartalev S.A., Ershov D.V., Loupian E.A., Tolpin V.A., 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).
- 3. Bartalev S.A., Stytsenko F.V., Khvostikov S.A., Loupian E.A., Methodology of post-fire tree mortality monitoring and prediction using remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 176–193 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-176-193.
- 4. Shinkarenko S. S., Berdengalieva A. N., 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. Bondur V.G., Satellite Monitoring of Wildfires during the anomalous heat wave of 2010 in russia, *Izvestiya*. *Atmospheric and Oceanic Physics*, 2011, Vol. 47, No. 9, pp. 1039–1048.
- 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).
- Zharinov S. N., Golubeva E. I., Influence of forest fire on mortality rates of population: a case study of Tver oblast, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Ser. Geograficheskaya*, 2018, No. 4, pp. 96–103 (in Russian), DOI: 10.1134/S2587556618040179.
- 8. Krivoshei V.A., The Volga River: Problems and Solutions, Moscow: Zhurnal "RT", 92 p. (in Russian).
- 9. 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 Nizhnevolzh-skogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee obrazovanie*, 2018, No. 4(52), pp. 89–96 (in Russian), DOI: 10.32786/2071-9485-2018-04-11.
- Loupian E.A., Proshin A.A., Burtsev M.A., Balashov I.V., Bartalev S.A., Efremov V.Yu., Kashnitskiy A.V., Mazurov A.A., Matveev A.M., Sudneva O.A., Sychugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A., IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284 (in Russian).

- 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.
- 12. Loupian E.A., Stytsenko F.V., Senko K.S., Balashov I.V., Mazurov A.A., Burnt area assessment using MODIS Collection 6 active fire data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 4, pp. 178–192 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-178-192.
- 13. Shinkarenko S. S., Assessment of steppe burning dynamics in Astrakhan Region, *Sovremennye proble-my 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.
- 14. 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.
- 15. 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.
- Shinkarenko S. S., Doroshenko V.V., Berdengalieva A. N., Komarova I.A. (2021a), 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.
- 17. Shinkarenko S. S., Ivanov N. M., Berdengalieva A. N. (2021b), Spatio-temporal dynamics of burnt areas in federal protected areas of South-East of the European part of Russia, *Nature Conservation Research*, 2021, Vol. 6, No. 3, pp. 23–44 (in Russian), DOI: 10.24189/ncr.2021.035.
- 18. Shinkarenko S. S., Bartalev S.A., Berdengalieva A.N., Ivanov N.M., Spatio-temporal analysis of burnt area in The Lower Volga floodplain, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 1, pp. 143–157 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-143-157.
- 19. Chung Y.S., Le H.V., Detection of forest-fire smoke plumes by satellite imagery, *Atmospheric Environment*, 1984, Vol. 18, No. 10, pp. 2143–2151, DOI: 10.1016/0004-6981(84)90201-4.
- Fu Y., Li R., Wang X., Bergeron Y., Valeria O., Chavardes R. D., Wang Y., Hu J., Fire Detection and Fire Radiative Power in Forests and Low-Biomass Lands in Northeast Asia: MODIS versus VIIRS Fire Products, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, No. 18, Art. No. 2870, DOI: 10.3390/rs12182870.
- 21. Giglio L., Loboda T., Roy D. P., Quale B., Justice C. O., An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor, *Remote Sensing of Environment*, 2020, Vol. 113, pp. 408–420, DOI: 10.1016/j. rse.2008.10.006.
- 22. 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.
- 23. Li F., Zhang X., Kondragunta S., Biomass Burning in Africa: An Investigation of Fire Radiative Power Missed by MODIS Using the 375 m VIIRS Active Fire Product, *Remote sensing*, 2020, Vol. 12, No. 10, Art. No. 1561, DOI: 10.3390/rs12101561.
- 24. Lozin D. V., Balashov I. V., Loupian E. A., Possibilities of near real-time forest cover damage estimation based on fires radiative power data, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2021, Vol. 806, 012019, DOI: 10.1088/1755-1315/806/1/012019.
- 25. 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.
- Pereira G., Longo K. M., Freitas S. R., Mataveli G., Oliveira V. J., Santos P. R., Rodrigues L. F., Cardozo F. S., Improving the South America wildfires smoke estimates: Integration of polar-orbiting and geostationary satellite fire products in the Brazilian biomass burning emission model (3BEM), *Atmospheric Environment*, 2022, Vol. 273, 118954, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2022.118954.
- 27. Ponomarev E. I., Litvintsev K. Yu., Ponomareva T. V., Shevtsov E. G., Yakimov N. D., Satellite monitoring of the wildfire in Siberia and fire emissions estimation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 6, pp. 45–50, DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-6-45-50.
- 28. Sperling S., Wooster M.J., Malamud B.D., Influence of Satellite Sensor Pixel Size and Overpass Time on Undercounting of Cerrado/Savannah Landscape-Scale Fire Radiative Power (FRP): An Assessment Using the MODIS Airborne Simulator, *Fire*, 2020, Vol. 3, No. 2, p. 11, DOI:10.3390/fire3020011.
- 29. 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.