

Пыльные бури на юге европейской части России осенью 2024 г.

С. С. Шинкаренко, С. А. Барталев

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: shinkarenko@d902.iki.rssi.ru

Анализируются закономерности возникновения и развития пыльной бури на юге Европейской России в конце сентября 2024 г. Исследование основано на данных MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (спутники Terra, Aqua) и VIIRS (*англ.* Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) (спутники Suomi NPP, NOAA-20, NOAA-21). По информации метеостанций пыльные бури отмечались с 27 сентября по 1 октября 2024 г., а по спутниковым данным песчано-пылевые шлейфы регистрировались в период 29 сентября – 1 октября. Максимальная площадь территории, покрытой пыльной бурей, зафиксирована MODIS/Aqua 30 сентября и была около 19 млн га при протяжённости более 800 км. Предпосылками возникновения пыльных бурь послужили атмосферная засуха (дефицит накопленных на конец сентября осадков составил 30–70 %) и почвенная засуха (отрицательная аномалия объёмной влажности верхнего горизонта почвы достигала $0,04\text{--}0,06\text{ м}^3/\text{м}^3$ при норме $0,12\text{--}0,14\text{ м}^3/\text{м}^3$), а также устойчивые ветры восточного и юго-восточного направления с максимальной скоростью более 20 м/с. Вынос минеральных частиц в 2024 г. отмечен преимущественно с пахотных земель на границе Калмыкии, Ставропольского края, Волгоградской и Ростовской областей, а также пастбищ на песчаных почвах на востоке Ставропольского края и юга Калмыкии.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, пыльные бури, дефляция, деградация, опустынивание, Прикаспий

Одобрена к печати: 12.11.2024
 DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-375-382

В конце сентября 2024 г. на юге европейской части России отмечались масштабные пыльные бури. Атмосферная и почвенная засухи на фоне сильных ветров юго-восточного и восточного направления на периферии блокирующего антициклона привели к возникновению масштабных пыльных бурь 2 сентября, а также в период 27 сентября – 1 октября (*рис. 1*, см. с. 376). Интенсивные дефляционные процессы, в том числе пыльные бури, особенно характерны для данной территории после чрезвычайно засушливого 2020 г., когда неблагоприятные гидротермические условия и чрезмерные пастбищные нагрузки привели к значительному росту площадей открытых песков и дефлированных территорий, лишённых растительного покрова (Титкова, Золотокрылин, 2022; Шинкаренко и др., 2024; Yuferev et al., 2023). В 2022 г. в Калмыкии, Дагестане и Ставропольском крае пыльные бури различной интенсивности отмечались ежемесячно с марта по август. В августе 2022 г. количество дней с сильными пыльными бурями достигло десяти, а по данным отдельных метеостанций превысило две недели (Дорошенко, 2023а; Шинкаренко, Барталев, 2022). В 2023 г. ситуация с пыльными бурями и дефляционными процессами несколько стабилизировалась вследствие благоприятных гидротермических условий (сумма выпавших осадков была близкой к многолетней норме) и снижения пастбищных нагрузок в результате существенного сокращения поголовья домашнего скота после 2020 г. (Шинкаренко и др., 2024). Пыльные бури способны нанести существенный ущерб посевам сельскохозяйственных культур (Кулик, Дубенок, 2016), а также вызвать усиление дефляционных процессов из-за разрастания массивов открытых песков (Шинкаренко и др., 2024). Цель данной работы заключается в анализе закономерностей возникновения и распространения пыльных бурь осенью 2024 г.

Исследование основывается на спутниковых изображениях MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (спутники Terra, Aqua) пространственного разрешения 1000 м и VIIRS (*англ.* Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) (спутники Suomi NPP, NOAA-20, NOAA-21) пространственного разрешения 750 м.

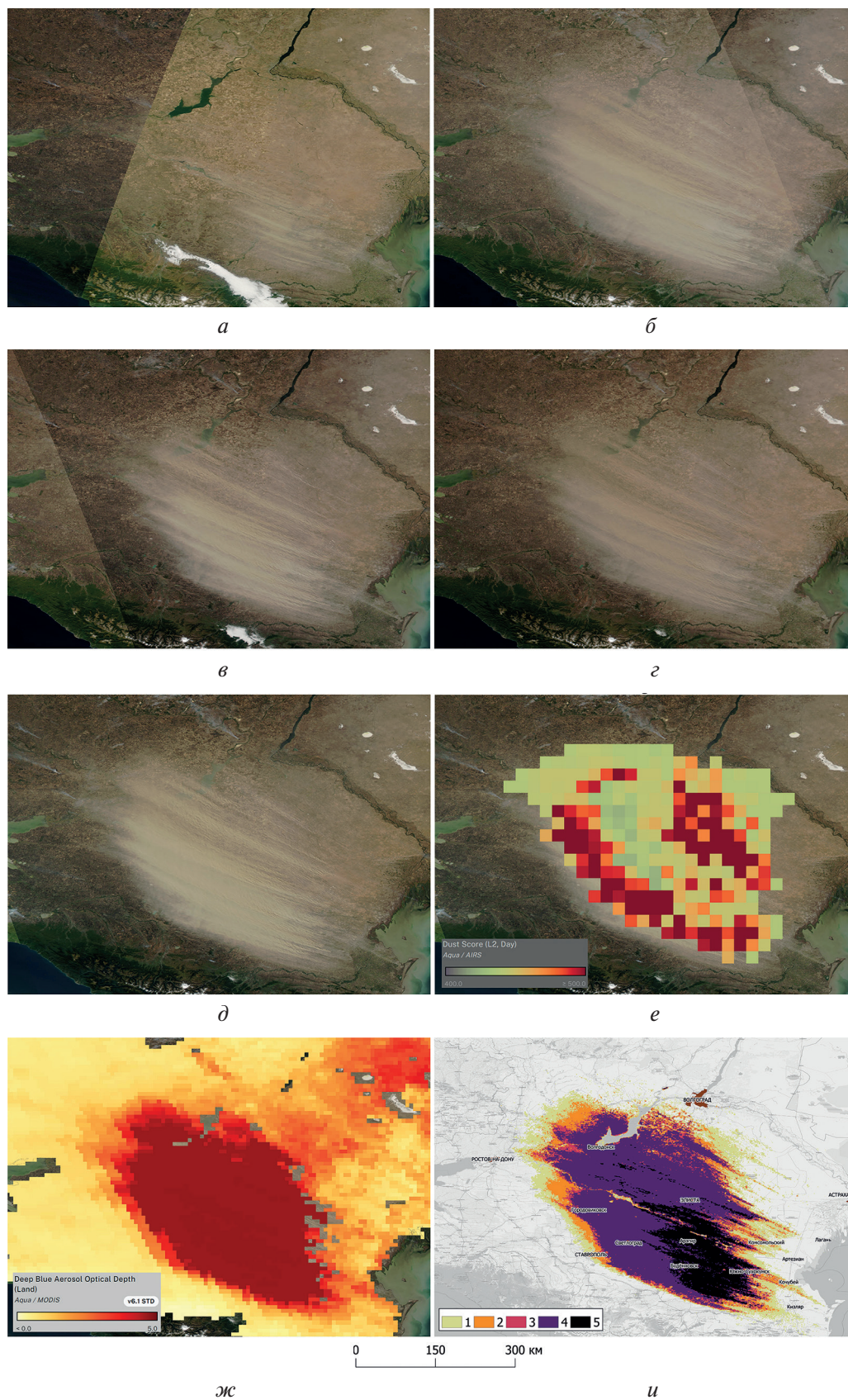
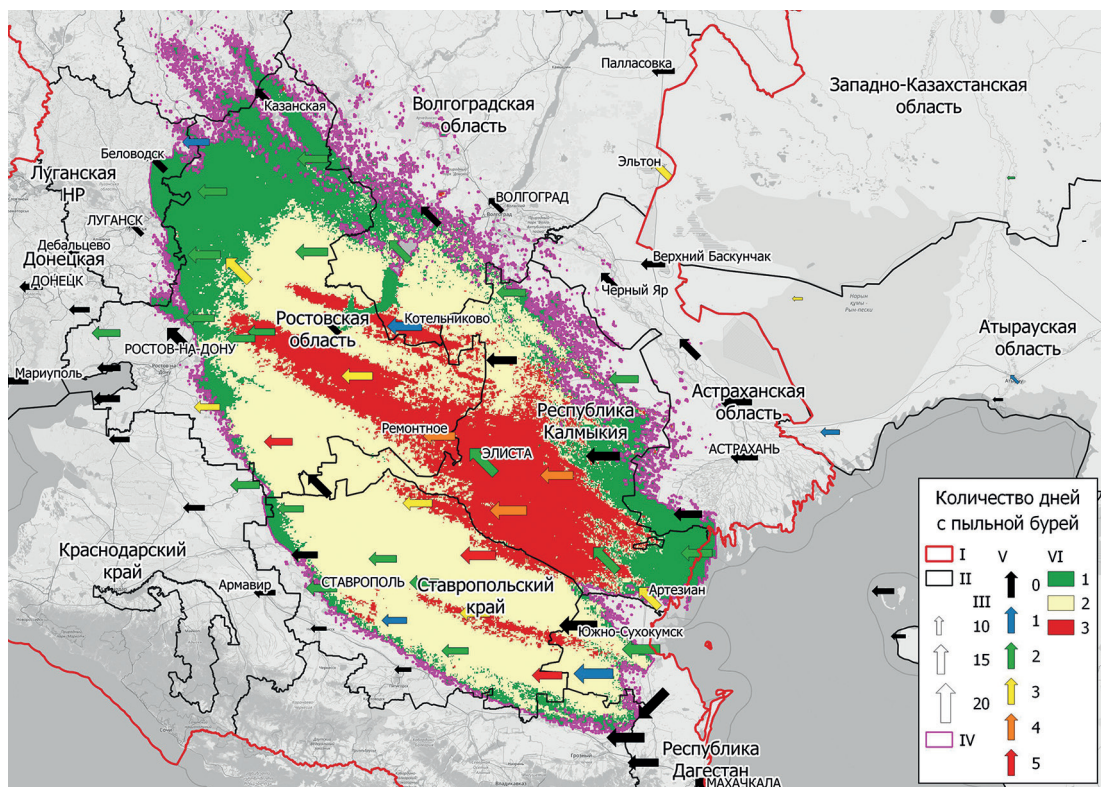
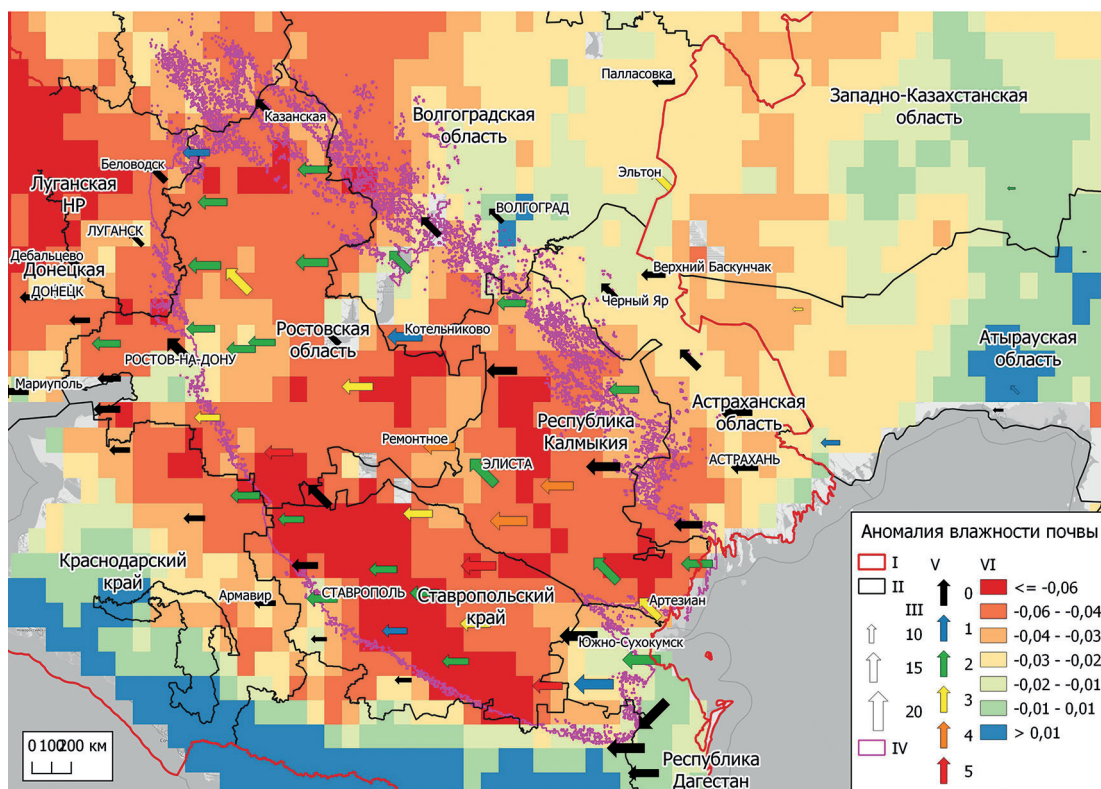


Рис. 1. Развитие пыльной бури 29 сентября 2024 г. Время наблюдения (московское, и далее по тексту): *a* — 09:40, MODIS/Terra; *б* — 11:47, VIIRS/Suomi NPP; *в* — 12:12, VIIRS/NOAA-20; *г* — 13:06, VIIRS/NOAA-21; *д* — 13:20, MODIS/Aqua; *e* — показатель Dust Score по данным AIRS/Aqua, *ж* — аэрозольная оптическая толщина в голубом диапазоне спектра по данным MODIS/Aqua, *и* — количество наблюдений пыльной бури указанными спутниковыми системами



а



б

Рис. 2. Скорость, направление ветра, количество наблюдений пыльных бурь (а) и аномалии влажности почвы (б) 27 сентября – 1 октября 2024 г. I – государственная граница РФ, II – границы регионов, III – среднемаксимальная скорость ветра, м/с, IV – максимальная зафиксированная площадь покрытия песчано-пылевого облака, V – количество дней с пыльными бурями по данным метеостанций, VI – количество дней с наблюдениями пыльных бурь по данным MODIS и VIIRS (а) и отклонение величины объёмной влажности почвы в сентябре 2024 г. от нормы, $\text{м}^3/\text{м}^3$ (б)

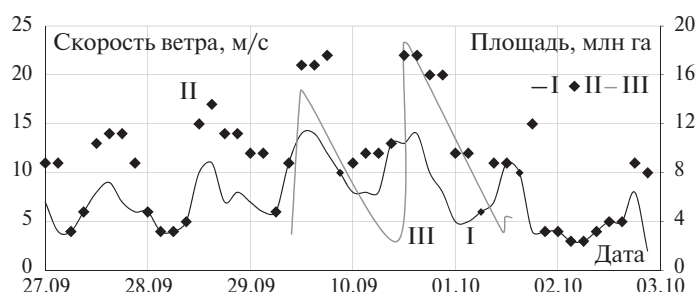


Рис. 3. Динамика средней (I), максимальной (II) скорости ветра по метеостанции в Элисте и площади песчано-пылевого облака по спутниковым данным (III)

Песчано-пылевое облако идентифицировалось на основе экспертного порога разницы радиояркостной температуры, измеренной с использованием спектральных каналов на длинах волн 11 и 12 мкм. Поскольку значения радиояркостной температуры на указанных длинах волн зависят как от плотности песчано-пылевого облака, так и от его высоты, то пороговые значения разницы температуры подбирались для каждого спутникового изображения в диапазоне 0,7–2,0 К. Подобный подход применяется для картографирования пепловых шлейфов (Гирина и др., 2019) и уже успешно использовался для определения песчано-пылевых облаков (Шинкаренко, Барталев, 2022; Zhang et al., 2006). Также в качестве дополнительных источников информации для идентификации пыльных бурь были взяты данные о состоянии атмосферы AIRS/Aqua (англ. Atmospheric Infrared Sounder) — показатель Dust Score (см. рис. 1е) разрешения 13,5 км (https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/AIRS2SUP_006/summary) — и MODIS/Aqua — аэрозольная оптическая толщина, измеренная в голубом диапазоне длин волн (см. рис. 1ж) пространственного разрешения 10 км (Levy, Hsu, 2015).

Метеоданные получены с помощью сервисов «Погода и климат» (pogodaiklimat.ru) и «Расписание погоды» (rp5.ru). Для каждой включённой в исследование метеостанции было определено количество дней с пыльными бурями в период 26 сентября—3 октября 2024 г., а также преобладающее направление ветра, его средняя, максимальная и среднемаксимальная скорость во время пыльных бурь (рис. 2а, см. с. 377). Для анализа влажности почвы использовался глобальный информационный продукт Soil moisture gridded data from 1978 to present (Preimesberger et al., 2023) пространственного разрешения 0,25°, который предоставляет сведения об объёмной влажности почвы (в м³/м³) на глубине 2–5 см. Указанный информационный продукт базируется на комбинации данных, получаемых на основе технологий активного и пассивного дистанционного зондирования Земли из космоса. Влажность почвы приповерхностного горизонта наряду с её гранулометрическим составом и величиной скорости ветра являются определяющими для возникновения дефляционной опасности (Buchkova et al., 2021). Анализировались отклонения средних значений на сентябрь 2024 г. от климатической нормы 1990–2020 гг. (см. рис. 2б). Спутниковые изображения получены с помощью сервиса «Вега-Science» (Лупян и др., 2015; Loupian et al., 2022). Геоинформационная обработка данных выполнена в программе QGIS.

Пыльные бури в конце сентября 2024 г. регистрировались метеостанциями с 27-го числа на северо-востоке Ставропольского края, при этом в первые дни они носили локальный характер и не фиксировались спутниковыми системами. Первое наблюдение пыльной бури на площади 3 млн га проведено спутниковой системой MODIS/Terra 29 сентября в 09:40. На этот момент средняя скорость ветра превысила 10 м/с, а максимальная — 20–22 м/с (рис. 3). По данным Ф. Д. Алахвердиева и О. С. Набиева (2017), в Северо-Западном Прикаспии критическая минимальная скорость ветра для возникновения пыльной бури на супесчаных тёмно-каштановых почвах составляет 8 м/с, а на бурых песчаных и супесчаных — 9 м/с, что соответствует наблюдаемым условиям 29–30 сентября 2024 г.

Максимальная протяжённость песчано-пылевого облака на юге европейской части России зафиксирована 30 сентября спутниковой системой MODIS/Aqua — примерно 820 км от побережья Каспийского моря до юго-восточных районов Воронежской области (см. рис. 2)

при площади около 19 млн га. Таким образом, в сентябре 2024 г. площадь пылевого шлейфа над европейской частью России стала больше, чем при катастрофических пыльных бурях 2020 г. (Шинкаренко и др., 2020). В этот же день пылевой шлейф после бури 29 сентября достиг центральной части Украины, а 1 октября — территории Республики Беларусь. По мере увеличения скорости ветра увеличивается и площадь песчано-пылевого облака, при этом максимум скорости ветра достигается в период 15:00–18:00, когда отсутствуют данные наблюдений с помощью использованных спутниковых систем. Поэтому фактическая площадь пылевых шлейфов может быть несколько больше. Песчано-пылевое облако на протяжении трёх дней (29 сентября–1 октября 2024) фиксировалось на площади 4,9 млн га, двух дней — 16,5 млн га, а общая площадь территории, которая была накрыта пыльной бурей по данным использованных спутниковых систем составила 22,3 млн га.

Границы максимальной зафиксированной площади пылевого шлейфа достаточно согласуются с ареалами наибольшего дефицита почвенной влаги в сентябре (от $-0,04 \text{ м}^3/\text{м}^3$ и ниже при норме $0,12\text{--}0,14 \text{ м}^3/\text{м}^3$) и распространения ветров со среднемаксимальной скоростью более $15\text{--}20 \text{ м/с}$ (см. рис. 2б). Почвенная засуха явилась следствием атмосферной: по данным большинства метеостанций, на которых многократно были зафиксированы пыльные бури, дефицит накопленных с начала года осадков в сентябре 2024 г. составил $30\text{--}70 \%$ от многолетней нормы.

Время сеансов съёмки спутников более высокого пространственного разрешения Landsat-8, -9 и Sentinel-2 приходится на утренние часы (10:00–11:00), когда фиксируются начальные стадии формирования песчано-пылевых облаков. Соответственно, по этим данным их площадь существенно меньше по сравнению с зафиксированной по данным спутниковых систем VIIRS и MODIS/Aqua. Тем не менее спутниковые изображения высокого пространственного разрешения дают возможность более точно идентифицировать источники выноса песка и пыли (рис. 4).

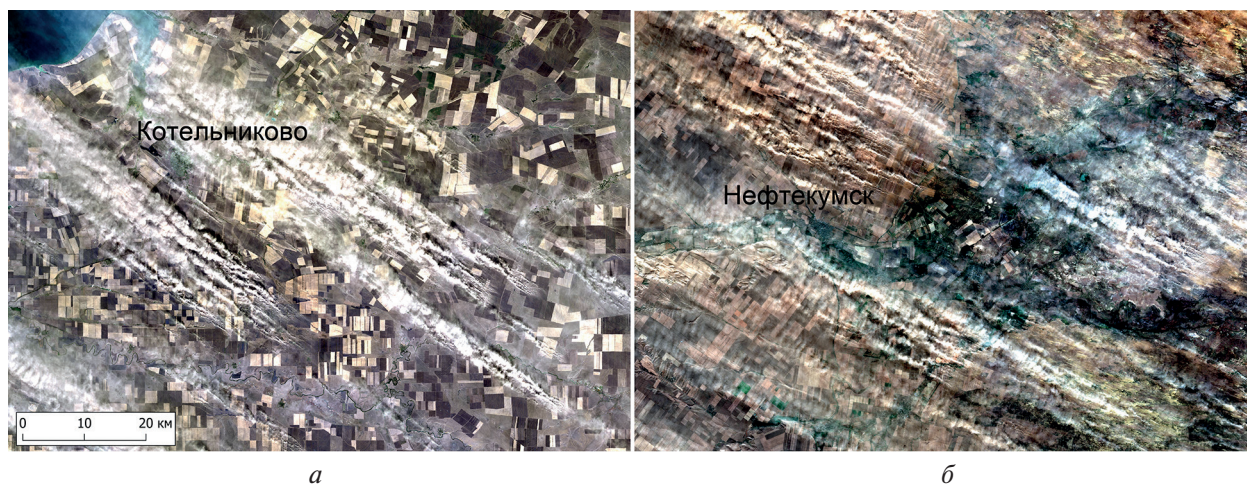


Рис. 4. Спутниковые изображения пыльной бури 30.09.2024 в окрестностях: а — г. Котельниково Волгоградской области (Landsat-9, 10:54); б — г. Нефтекумск Ставропольского края (Sentinel-2, 11:07)

В 2020–2021 гг. пыльные бури формировались преимущественно на сильно деградированных пастбищах, лишённых растительного покрова из-за чрезмерного выпаса, в то время как в 2022 г. интенсивным дефляционным процессам в значительной степени были подвержены пахотные земли (Дорошенко, 2023б; Шинкаренко, Барталев, 2022; Шинкаренко и др., 2020). В 2024 г. источником минеральных частиц для пыльных бурь были также преимущественно пахотные земли, что подтверждается как спутниковыми изображениями Landsat и Sentinel-2, так и локализацией участков с наибольшим количеством наблюдений пыльных бурь на севере Ставропольского края, западе Калмыкии, юге Волгоградской и востоке Ростовской областей, где преобладают пахотные земли на каштановых и светло-каштановых

солонцеватых почвах в комплексе с солонцами. Наиболее подверженные пыльным бурям пастбища расположены на юге Калмыкии (бурые песчаные и супесчаные почвы, а также пески) и в восточной части Ставропольского края, где также распространены супесчаные почвы и пески.

Заключение

Предпосылками пыльных бурь на юге европейской части России в сентябре 2024 г. стали почвенная и атмосферная засухи и сильные ветры восточного и юго-восточного направления. Максимальная протяжённость песчано-пылевого облака, зафиксированного по данным метеостанций и дистанционного зондирования, превысила 800 км 30 сентября, а площадь его составила около 19 млн га при максимальной скорости ветра свыше 15–20 м/с. В отличие от периода 2020–2022 гг. в текущем году источником минеральных частиц для пыльной бури служили преимущественно пахотные земли на пограничной территории четырёх регионов: Калмыкии, Ставропольского края, Волгоградской и Ростовской областей. Наиболее интенсивный вынос пыли и песка с пастбищ зафиксирован на востоке Ставропольского края и юге Калмыкии. Район распространения песчано-пылевого облака совпадает с ареалами отрицательной аномалии влажности верхнего горизонта почвы и максимальной скорости ветра более 20 м/с. Это позволяет использовать данные о влажности почвы, в том числе на основе спутниковой информации, и прогноз синоптической обстановки для оценки угрозы возникновения пыльных бурь. Масштабные пыльные бури осени 2024 г. могут привести к дальнейшему увеличению площадей открытых песков и деградированных земель, что в свою очередь способно вызвать последующую интенсификацию процессов дефляции в регионе. Это обуславливает необходимость дальнейшего мониторинга площадей дефлированных территорий на юге европейской части России.

Работа выполнена в рамках темы ИКИ РАН «Мониторинг» (госрегистрация № 122042500031-8) с использованием сервиса «Вега-Science» и инфраструктуры Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг».

Литература

1. Алахвердиев Ф. Д., Набиев О. С. Исследование механизмов дефляции в Северо-Западном Прикаспии индикационными методами для целей охраны и оптимизации почвенных ресурсов // Изв. Дагестанского гос. педагог. ун-та. Естественные и точные науки. 2017. Т. 11. № 3. С. 90–95.
2. Гирина О. А., Лупян Е. А., Мельников Д. В. и др. Создание и развитие информационной системы «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 249–265. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-249-265.
3. Дорошенко В. В. (2023а) Воздействие пыльных бурь на пахотные земли на северо-востоке Ставропольского края в 2022 г. // Научно-агроном. журн. 2023. № 3(122). С. 23–28. DOI: 10.34736/FNC.2023.122.3.003.23-28.
4. Дорошенко В. В. (2023б) Пыльные бури на востоке Ставропольского края в 2017–2022 гг. // Вопросы степеведения. 2023. № 3. С. 41–48. DOI: 10.24412/2712-8628-2023-3-41-48.
5. Кулик К. Н., Дубенок Н. Н. Пыльные бури на Нижней Волге весной 2015 года // Вестн. Российской с.-х. науки. 2016. № 1. С. 4–7.
6. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашиницкий 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.
7. Титкова Т. Б., Золотокрылин А. Н. Мониторинг подверженных опустыниванию земель Республики Калмыкия // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 130–141. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-130-141.

8. Шинкаренко С. С., Барталев С. А. Спутниковые наблюдения пыльных бурь на юге России в 2022 году // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 6. С. 293–300. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-293-300.
9. Шинкаренко С. С., Ткаченко Н. А., Барталев С. А. и др. Пыльные бури на юге европейской части России в сентябре–октябре 2020 года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 291–296. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-291-296.
10. Шинкаренко С. С., Барталев С. А., Биарсланов А. Б. Изменения площадей открытых песков и дефлированных пастбищ на юго-востоке европейской части России в 2023 году // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 3. С. 321–330. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-321-330.
11. Bychkova V. I., Pripachkin D. A., Rubinshtein K. G. Dust/sand storm initiation diagnosis using empirical data // Russian Meteorology and Hydrology. 2021. V. 46, No. 7. P. 454–460. DOI: 10.3103/S1068373921070049.
12. Levy R. C., Hsu N.-C. MODIS Atmosphere L2 Aerosol Product. NASA MODIS Adaptive Processing System. Goddard Space Flight Center, USA, 2015. DOI: 10.5067/MODIS/MYD04_L2.061.
13. Loupian E., Burtsev M., Proshin A. et al. Usage experience and capabilities of the VEGA-Science system // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 1. Article 77. DOI: 10.3390/rs14010077.
14. Preimesberger W., Reimer C., van der Schalie R. et al. Soil moisture gridded data from 1978 to present, v202212.0.0. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2023. <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/satellite-soil-moisture?tab=overview>.
15. Yuferev V. G., Silova V. A., Tkachenko N. A. Remote monitoring of desertification in Kalmykia // Arid Ecosystems. 2023. V. 13. No. 1. P. 39–44. DOI: 10.1134/S2079096123010171.
16. Zhang P., Lu N., Hu X., Dong C. Identification and physical retrieval of dust storm using three MODIS thermal IR channels // Global and Planetary Change. 2006. V. 52. Iss. 1–4. P. 197–206. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2006.02.014.

Dust storms in the south of the European part of Russia in autumn 2024

S. S. Shinkarenko, S. A. Bartalev

*Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: shinkarenko@mail.smislab.ru*

This research letter analyzes the patterns of occurrence and development of dust storms in southern European Russia at the end of September 2024. The study is based on satellite data from MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer; Terra and Aqua satellites) and VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite; Suomi NPP, NOAA-20, NOAA-21 satellites). According to meteorological station data, dust storms were recorded from September 27 to October 1, 2024, while satellite observations indicated the presence of sand-dust plumes between September 29 and October 1. The maximum area affected by the dust storm was recorded by the Aqua MODIS on September 30, covering approximately 19 million hectares and extending over 800 km. The prerequisites for the occurrence of dust storms included atmospheric drought (with a precipitation deficit of 30–70 % by the end of September) and soil drought (with a negative anomaly in volumetric soil moisture of 0.04–0.06 m³/m³ at a standard of 0.12–0.14 m³/m³), as well as sustained winds from east and south-east with maximum speeds exceeding 20 m/s. The transport of mineral particles in 2024 was primarily noted from arable lands along the borders of Kalmykia, Stavropol Krai, Volgograd Region, and Rostov Region, as well as from pastures on sandy soils in eastern Stavropol Krai and southern Kalmykia.

Keywords: remote sensing, dust storms, deflation, degradation, desertification, Caspian region

Accepted: 12.11.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-375-382

References

1. Alakhverdiev F. D., Nabiev O. S., Analysis of deflation mechanisms in the North-Western Caspian Sea region by means of indicating methods of protection and optimization soil resources, *Izvestiya Dagestanskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Estestvennye i tochnye nauki*, 2017, Vol. 11, No. 3, pp. 90–95 (in Russian).
2. Girina O. A., Loupian E. A., Melnikov D. V. et al., Creation and development of the information system “Remote Monitoring of Kamchatka and Kuril Islands Volcanic Activity”, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 249–265 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-249-265.
3. Doroshenko V. V. (2023a), The impact of dust storms on arable land in the North-East of the Stavropol Region in 2022, *Nauchno-agronomicheskii zhurnal*, 2023, No. 3 (122), pp. 23–28 (in Russian), DOI: 10.34736/FNC.2023.122.3.003.23-28.
4. Doroshenko V. V. (2023b), Dust storms in the east of the Stavropol Region for 2017–2022, *Voprosy stepenedeniya*, 2023, No. 3, pp. 41–48 (in Russian), DOI: 10.24412/2712-8628-2023-3-41-48.
5. Kulik K. N., Dubenok N. N., Dust storms at the Low Volga in spring of 2015, *Vestnik Rossiiskoi sel'skokhozyaistvennoi nauki*, 2016, No. 1, pp. 4–7 (in Russian).
6. 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).
7. Titkova T. B., Zolotokrylin A. N., Monitoring of lands affected by desertification in the Republic of Kalmykia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 2, pp. 130–141 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-130-141.
8. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Satellite observations of dust storms in southern Russia in 2022, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 6, pp. 293–300 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-293-300.
9. Shinkarenko S. S., Tkachenko N. A., Bartalev S. A. et al., Dust storms in the south of the European part of Russia in September–October 2020, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 5, pp. 291–296 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-291-296.
10. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Bianslanov A. B., Changes in the areas of open sands and deflated pastures in the southeastern part of European Russia in 2023, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, Vol. 21, No. 3, pp. 321–330 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-321-330.
11. Bychkova V. I., Pripachkin D. A., Rubinshtein K. G., Dust/sand storm initiation diagnosis using empirical data, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2021, Vol. 46, No. 7, pp. 454–460, DOI: 10.3103/S1068373921070049.
12. Levy R. C., Hsu N.-C., *MODIS Atmosphere L2 Aerosol Product. NASA MODIS Adaptive Processing System*, Goddard Space Flight Center, USA, 2015, DOI: 10.5067/MODIS/MYD04_L2.061.
13. Loupian E., Burtsev M., Proshin A. et al., Usage experience and capabilities of the VEGA-Science system, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, No. 1, Article 77, DOI: 10.3390/rs14010077.
14. Preimesberger W., Reimer C., van der Schalie R. et al., *Soil moisture gridded data from 1978 to present, v202212.0.0*, Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2023, <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/satellite-soil-moisture?tab=overview>.
15. Yuferev V. G., Silova V. A., Tkachenko N. A., Remote monitoring of desertification in Kalmykia, *Arid Ecosystems*, 2023, Vol. 13, No. 1, pp. 39–44, DOI: 10.1134/S2079096123010171.
16. Zhang P., Lu N., Hu X., Dong C., Identification and physical retrieval of dust storm using three MODIS thermal IR channels, *Global and Planetary Change*, 2006, Vol. 52, Iss. 1–4, pp. 197–206, DOI: 10.1016/j.gloplacha.2006.02.014.