



*Российская Академия Наук*

**Д.П. Губанова<sup>1,\*</sup>, О.Г. Чхетиани<sup>1</sup>, Т.М. Кудерина<sup>2</sup>, М.А. Иорданский<sup>1</sup>,  
Ю.И. Обвинцев<sup>1</sup>, М.С. Артамонова<sup>1</sup>, Л.О. Максименков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

<sup>2</sup>Институт географии РАН

*\*e-mail: gubanova@ifaran.ru*

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АРИДНОГО АЭРОЗОЛЯ  
ПРИКАСПИЯ И ПРИАРАЛЬЯ КАК УДАЛЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ  
АТМОСФЕРНОЙ ПЫЛИ В ЦЕНТРАЛЬНЫХ И СЕВЕРНЫХ РАЙОНАХ  
ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ**

**V Всероссийская конференция с международным участием  
«Турбулентность, динамика атмосферы и климата»,  
посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова**

**19–21 ноября 2024, г. Москва**

**Глобальная пылевая нагрузка увеличилась**

на **55 ± 30%** по сравнению с доиндустриальным периодом, что в значительной степени обусловлено **увеличением эмиссии пыли в Азии и Северной Африке**.

**Пылевая компонента атмосферного аэрозоля** играет активную роль в атмосферных процессах и оказывает воздействие на:

- радиационный баланс, состав, свойства, физико-химию атмосферы,
- климат Земли (прямое и косвенное),
- экосистемы, биогеохимию океана и суши,
- здоровье и условия жизнедеятельности человека.



**Суммарный радиационный эффект:**  $-0.2 \pm 0.5 \text{ Вт/м}^2$  (90% доверительный интервал), что позволяет предположить, что **пылевая нагрузка охлаждает климат**.



**Явления дальнего атмосферного переноса пыли из Арало-Каспийского региона в последние годы экспериментально регистрируются** в ходе непрерывных наблюдений в ИФА РАН.

Модельные оценки: **количество пыли над Средней Азией** за счет эмиссии с территории новой пустыни Аралкум, в среднем **ежегодно увеличивается на 7 %**.

**Аридные и семиаридные зоны юга ЕЧР, Прикаспия и Приаралья** – основные мощные источники минеральной пыли, оказывающие влияние на регионы центральной и северной частей Европейской России (включая Российскую Арктику).



**Аэрозоли минеральной пыли** представляют собой взвешенные в атмосфере мелкие частицы горных пород диаметром  $d < \sim 100$  мкм.

**Большая часть пыли** образуется при баллистическом ударе переносимых ветром песчинок о поверхность сухих почв с редкой растительностью, которые выбрасывают и дробят почвенные частицы. Из-за этих механических воздействий **пыль** представляет собой относительно **крупный аэрозоль**, **большая часть массы которого содержится в мелкой** ( $d > 2.5$  мкм) и **крупной** ( $d > 10$  мкм) размерных фракциях.

**Пыль** образуется **в огромных количествах в пустынях мира**, при этом ее общее содержание в атмосфере **~26 миллионов тонн**, что по массе составляет **значительную часть атмосферного аэрозоля**.

**Массовая нагрузка крупной пыли (2.5–10 мкм в диаметре)** составляет приблизительно **14 Тг** (95 % доверительный интервал: 10-18 Тг). **Это более чем в три раза превышает глобальную массовую нагрузку мелкодисперсной пыли (около 4 Тг, 3-6 Тг).**

Adebisi, A. A., and J. F. Kok. **Climate models miss most of the coarse dust in the atmosphere.** *Science Advances*, 6, eaaz9507 (2020). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz9507>.

Kok, J. F., Adebisi, A. A., Albani et al. **Contribution of the world's main dust source regions to the global cycle of desert dust.** *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 8169–8193 (2021). <https://doi.org/10.5194/acp-21-8169-2021>.

# АКТУАЛЬНОСТЬ ВОПРОСА: ЕЖЕГОДНЫЕ ДОКЛАДЫ ВМО ОБ АТМОСФЕРНОЙ ПЫЛИ

**Бюллетени ВМО об атмосферной пыли, источниках ее эмиссии в настоящем и будущем, частоте и опасностях пыльных и песчаных бурь (издаются с 2017 г.)**



**WMO AIRBORNE DUST BULLETIN**  
No. 1 March 2017

For assessment and documentation of air pollution, airborne dust and dust storms affect both the environmental property and human health. Towards air health, which is only partially understood, the dust problem is a complex one, because dust is a mixture of natural and anthropogenic particles. It can also transport microorganisms and other hazardous agents. Other impacts include regions where air is ground transport, such as sea, agriculture and the generation of haze events. The dust problem is a global one, with dust storms being most frequent in arid and semi-arid regions. Dust storms are a major component of atmospheric aerosols, which are an important physical and chemical component of an atmosphere. Dust storms are being increasingly considered as a climate change factor, as they influence the atmospheric dynamics, clouds and precipitation.

Recognizing the need for international coordination of the diverse countries that are active in the scientific research of dust and dust storms, the World Meteorological Organization took the lead and worked with international partners to develop a series of publications. The first of these is an international partnership of research and operational communities (WMO et al., 2016, <https://www.wmo.int>).

**WMO AIRBORNE DUST BULLETIN**  
No. 2 May 2018

Sand and dust storms (SDS) are multiple environmental hazards in arid and semi-arid regions of the planet. Their dust mass emissions are the highest worldwide, with up to 10 Gt per year. The dust particles that are emitted are a major component of atmospheric aerosols, which are an important physical and chemical component of an atmosphere. Dust storms are being increasingly considered as a climate change factor, as they influence the atmospheric dynamics, clouds and precipitation.

Recognizing the need for international coordination of the diverse countries that are active in the scientific research of dust and dust storms, the World Meteorological Organization took the lead and worked with international partners to develop a series of publications. The first of these is an international partnership of research and operational communities (WMO et al., 2016, <https://www.wmo.int>).

**WMO AIRBORNE DUST BULLETIN**  
No. 3 May 2019

Sand and dust storms (SDS) are multiple environmental hazards in arid and semi-arid regions of the planet. Their dust mass emissions are the highest worldwide, with up to 10 Gt per year. The dust particles that are emitted are a major component of atmospheric aerosols, which are an important physical and chemical component of an atmosphere. Dust storms are being increasingly considered as a climate change factor, as they influence the atmospheric dynamics, clouds and precipitation.

Recognizing the need for international coordination of the diverse countries that are active in the scientific research of dust and dust storms, the World Meteorological Organization took the lead and worked with international partners to develop a series of publications. The first of these is an international partnership of research and operational communities (WMO et al., 2016, <https://www.wmo.int>).

**WMO AIRBORNE DUST BULLETIN**  
No. 4 May 2020

Sand and dust storms (SDS) are multiple environmental hazards in arid and semi-arid regions of the planet. Their dust mass emissions are the highest worldwide, with up to 10 Gt per year. The dust particles that are emitted are a major component of atmospheric aerosols, which are an important physical and chemical component of an atmosphere. Dust storms are being increasingly considered as a climate change factor, as they influence the atmospheric dynamics, clouds and precipitation.

Recognizing the need for international coordination of the diverse countries that are active in the scientific research of dust and dust storms, the World Meteorological Organization took the lead and worked with international partners to develop a series of publications. The first of these is an international partnership of research and operational communities (WMO et al., 2016, <https://www.wmo.int>).

**WMO AIRBORNE DUST BULLETIN**  
No. 5 July 2021

The World Meteorological Organization (WMO) uses one of the first United Nations Agencies, which first addressed the problem of SDS, first observation, assessment and forecasting in response to the request of 40 member States. The WMO's work on SDS is part of its broader mandate to provide scientific advice and technical support to its member States. The WMO's work on SDS is part of its broader mandate to provide scientific advice and technical support to its member States.

**WMO AIRBORNE DUST BULLETIN**  
No. 6 September 2021

Overview of global airborne dust in 2021. The global average of annual mean dust surface concentration in 2021 (13.8 µg m<sup>-3</sup>) was slightly higher than that in 2020 (13.5 µg m<sup>-3</sup>), and was slightly lower than that in 2022 (15.0 µg m<sup>-3</sup>). The WMO's work on SDS is part of its broader mandate to provide scientific advice and technical support to its member States.

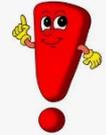
**WMO AIRBORNE DUST BULLETIN**  
No. 7 September 2022

Overview of global airborne dust in 2022. The global average of annual mean dust surface concentration in 2022 (15.0 µg m<sup>-3</sup>) was higher than that in 2021 (13.8 µg m<sup>-3</sup>), and was slightly higher than that in 2020 (13.5 µg m<sup>-3</sup>). The WMO's work on SDS is part of its broader mandate to provide scientific advice and technical support to its member States.

**WMO AIRBORNE DUST BULLETIN**  
No. 8 July 2023

Overview of global airborne dust in 2023. The global average of annual mean dust surface concentration in 2023 (16.5 µg m<sup>-3</sup>) was higher than that in 2022 (15.0 µg m<sup>-3</sup>), and was slightly higher than that in 2021 (13.8 µg m<sup>-3</sup>). The WMO's work on SDS is part of its broader mandate to provide scientific advice and technical support to its member States.

**В 2023 году активность песчаных и пыльных бурь превысила среднее многолетнее значение.**



**Регионы, наиболее уязвимые от дальнего переноса пыли: северная тропическая часть Атлантического океана между Западной Африкой и Карибским бассейном; Южная Америка; Средиземное море; Аравийское море; Бенгальский залив; центрально-восточный Китай; Корейский полуостров и Япония.**

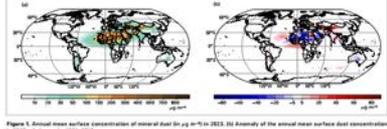
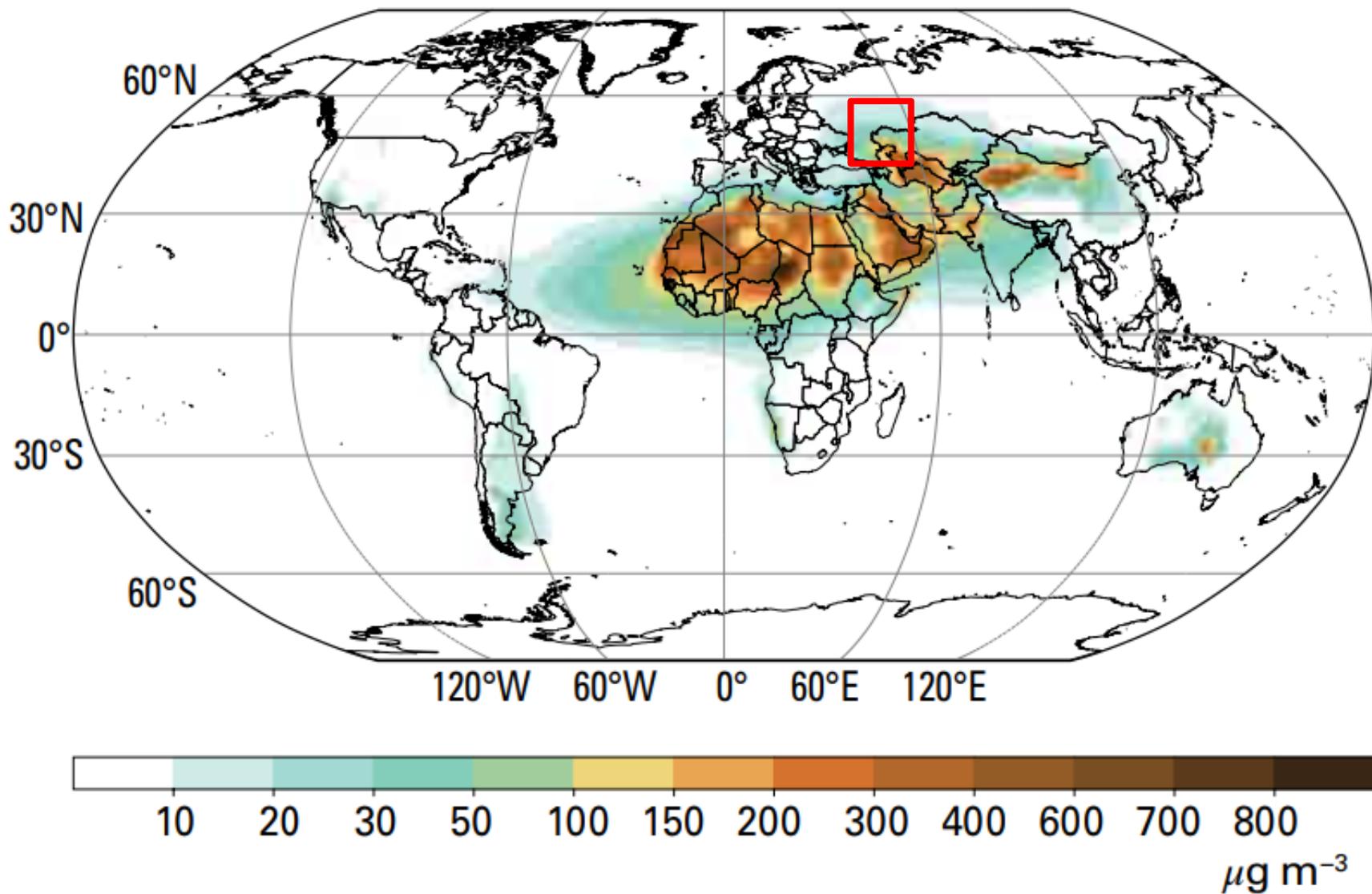
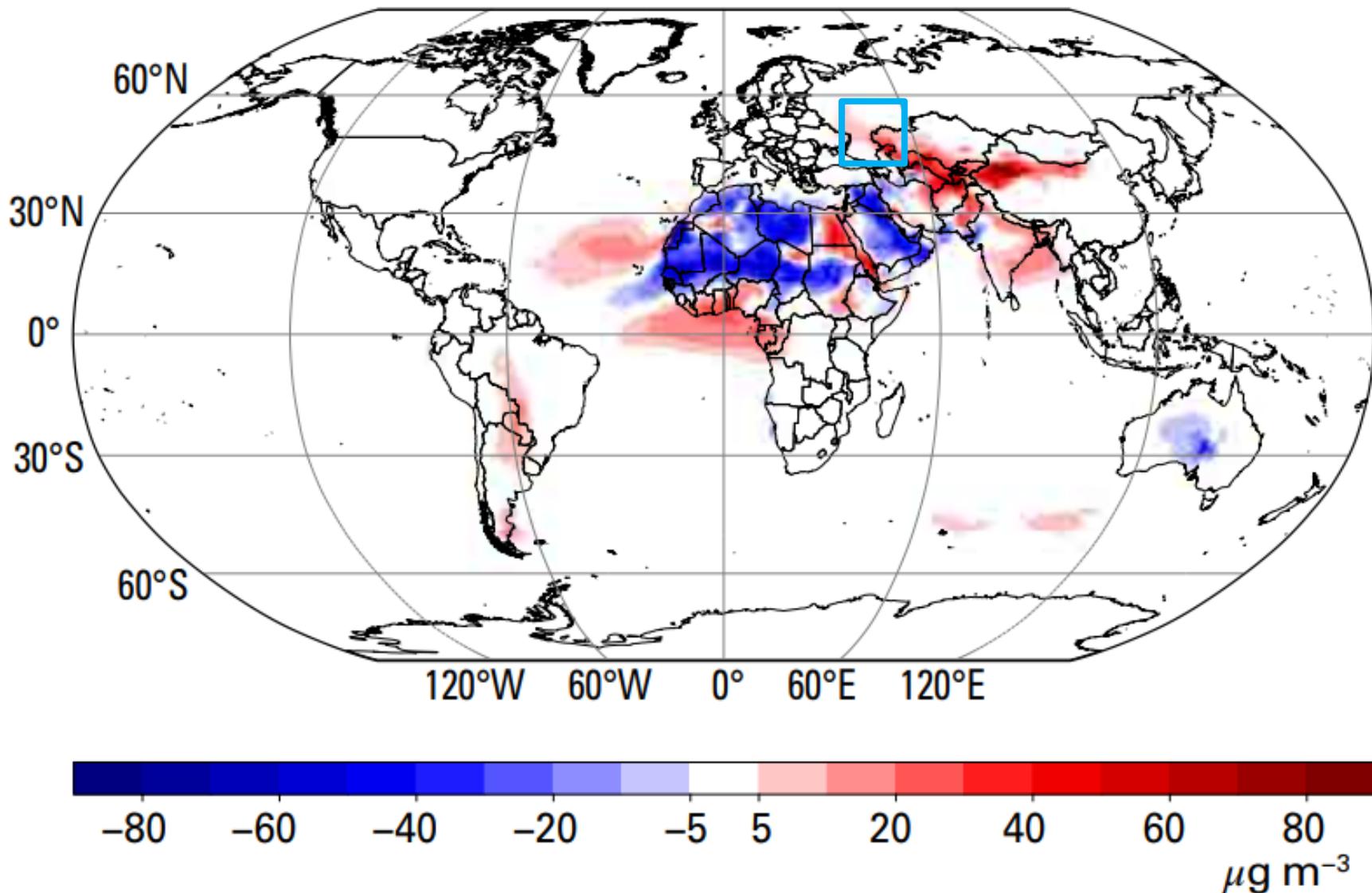


Figure 3. Annual mean surface concentration of annual dust by µg m<sup>-3</sup> in 2023. By analogy, the annual mean surface dust concentration in 2022 relative to the 1981-2020 base.

# СРЕДНЕГОДОВАЯ ПРИЗЕМНАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ МИНЕРАЛЬНОЙ ПЫЛИ В 2023 ГОДУ



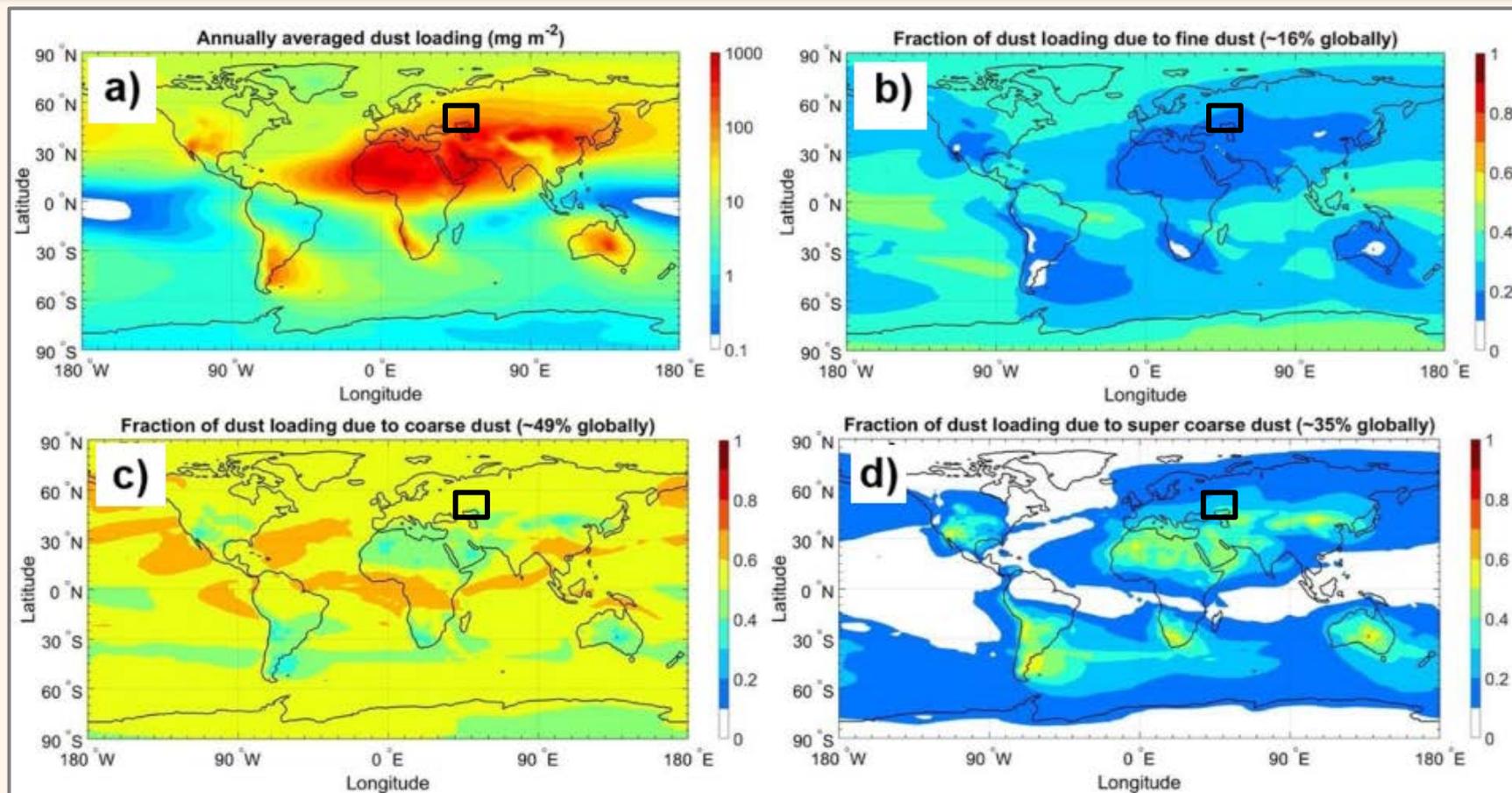
# АНОМАЛИЯ СРЕДНЕГОДОВОЙ ПРИЗЕМНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЫЛИ В 2023 г. ПО СРАВНЕНИЮ СО СРЕДНИМ ЗНАЧЕНИЕМ ЗА 1981-2010 гг.



Результаты получены на основе данных реанализа MERRA-2 (WMO Airborne dust bulletin No. 8, July 2024, <https://wmo.int/publication-series/wmo-airborne-dust-bulletin-no-8-july-2024>)

# ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕГОДОВНОЙ ГЛОБАЛЬНОЙ ПЫЛЕВОЙ НАГРУЗКИ

Пространственное распределение пылевой нагрузки в столбе ( $\text{мг}/\text{м}^2$ ): (a) усредненной за год (0.2–100 мкм); (b) доли мелкодисперсной пыли (0.2–2.5 мкм), (c) доли крупной пыли (2.5–10 мкм), и (d) доли очень крупной пыли (10–62.5 мкм). При оценке использованы данные DustCOMM для пыли диаметром до 20 мкм, дополненной моделями системы Community Earth для пыли диаметром до 100 мкм.

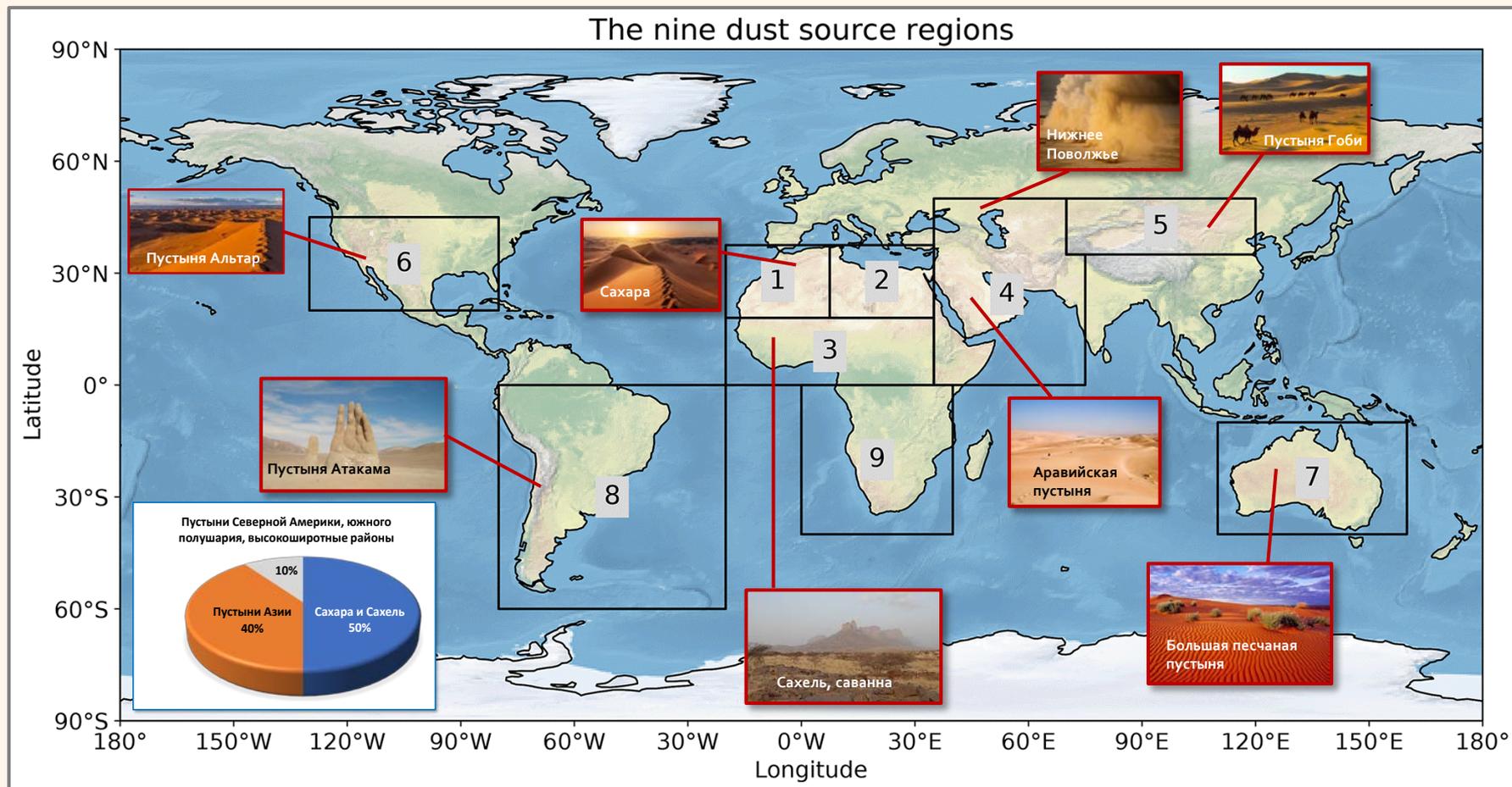


Kok, J. F., Adebisi, A. A., Albani et al. **Contribution of the world's main dust source regions to the global cycle of desert dust.** *Atmos. Chem. Phys.*, **21**, 8169–8193 (2021). <https://doi.org/10.5194/acp-21-8169-2021>.

Adebisi, A. A., J. F. Kok, B. J. Murray, et al. **A review of coarse mineral dust in the Earth system.** *Aeolian Research*, **60**, 100849 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2022.100849>.

## Девять основных регионов-источников пыли:

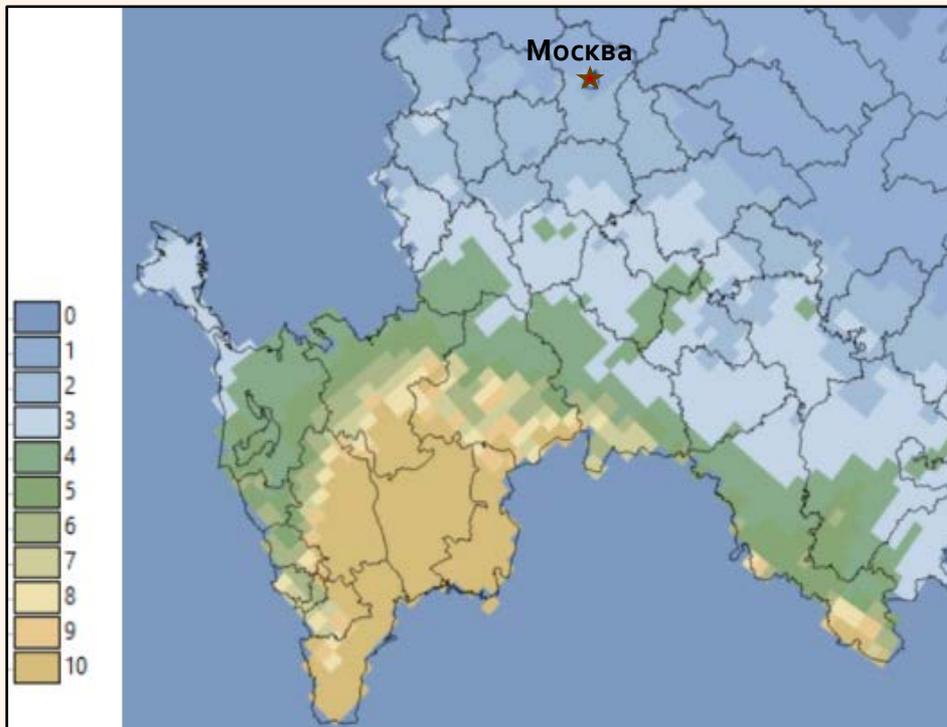
(1) Западная часть Северной Африки, (2) восточная часть Северной Африки, (3) южная Сахара и Сахель, (4) Ближний Восток и Центральная Азия, (5) Восточная Азия, (6) Северная Америка, (7) Австралия, (8) Южная Америка и (9) южная Африка.





**Аридные и семиаридные зоны юга ЕЧР, Прикаспия и Приаралья – основные мощные источники минеральной пыли, оказывающие влияние на регионы центральной и северной Европейской части России (включая Российскую Арктику)**

Среднегодовое содержание пыли в атмосфере (Тг) над югом ЕЧР по данным спутниковых наблюдений



На территории юга ЕЧР наиболее **частому и интенсивному воздействию пыльных бурь** подвержены **Республика Калмыкия, Ростовская и Волгоградская области, Ставропольский край.**

**Восточная и юго-восточная часть территории Республики Калмыкия во все сезоны года – активный очаг пыльных бурь.**

В ходе опасного процесса **песчаные массы с территории Черных земель (Калмыкия)** перемещаются далеко за пределы республики, **достигая при катастрофических процессах границ восточно-европейских государств.**

Для юга Калмыкии характерно **обилие массивов перевеваемых песков, широтно-ориентированных по направлению господствующих ветров, наличие дефляционных котловин, барханных полей, песчаных гряд и песчаных массивов.**

Возникновению **пыльных бурь** способствуют:

- **аридность климата,**
- **интенсивная ветровая деятельность,**
- **равнинность территории,**
- **наличие почв легкого механического состава,**
- **засоленность почв.**

**Распашка в 60-х гг. XX в. 110 тыс. га целинных песчаных земель в Калмыкии** образовала впоследствии основные **ядра образования пыльных бурь в Калмыкии и самые крупные массивы (площадью более 150 га).**

**Романовская А.Ю., Савин И.Ю. Аэрозольная пыль почвенного происхождения в атмосфере: источники, количество, свойства (обзор) // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2021. Вып. 109. С. 36-95. DOI: 10.19047/0136-1694-2021-109-36-95.**

**Глушко А.Я., Разумов В.В., Рейхани М.Д. Дegradaция земель Юга европейской части России под воздействием пыльных бурь // «Юг России: экология, развитие». 2010. № 1. С. 146-151. <https://ecodag.elpub.ru/ugro/article/viewFile/605/596>.**



На территории Юга ЕЧР пыльные бури возможны практически в течение всего года.

Основной период пыльных бурь на юге ЕЧР: март-октябрь, наиболее часто - весной.

На территории Ростовской области, особенно в ее восточной части, пыльные бури часты, довольно продолжительны (до нескольких недель) и охватывают значительные территории. Самым опасным периодом считается конец марта – конец апреля.

В Волгоградской области пыльные бури наиболее часты в заволжских и северных районах области. Их общая продолжительность составляет там не менее 10–15 дней ежегодно.

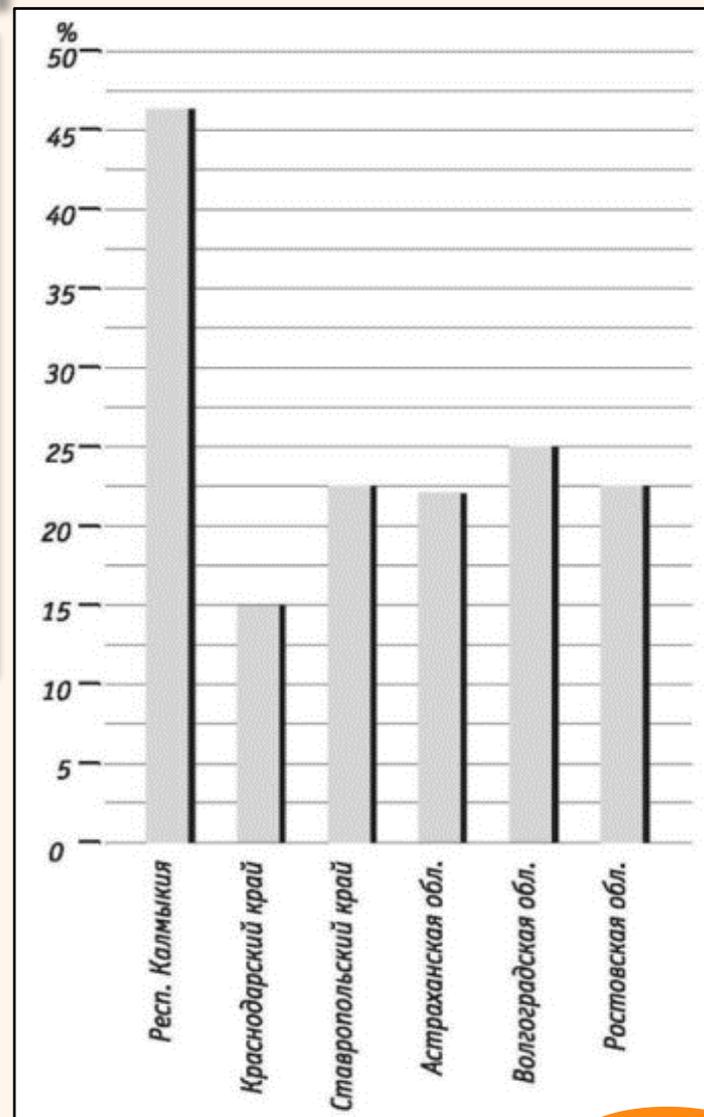
В Ставропольском крае пыльные бури обычно возникают при сухих восточных ветрах. Чаще всего пыльные бури наблюдаются весной и летом, зимние пыльные бури – явление достаточно редкое. Наибольшее число дней с пыльными бурями наблюдается в крайних восточных районах края, в западных и юго-западных районах пыльных бурь практически не бывает.

Глушко А.Я., Разумов В.В., Рейхани М.Д. Деградация земель Юга европейской части России под воздействием пыльных бурь // «Юг России: экология, развитие». 2010. № 1. С. 146-151.

<https://ecodag.elpub.ru/ugro/article/viewFile/605/596>.

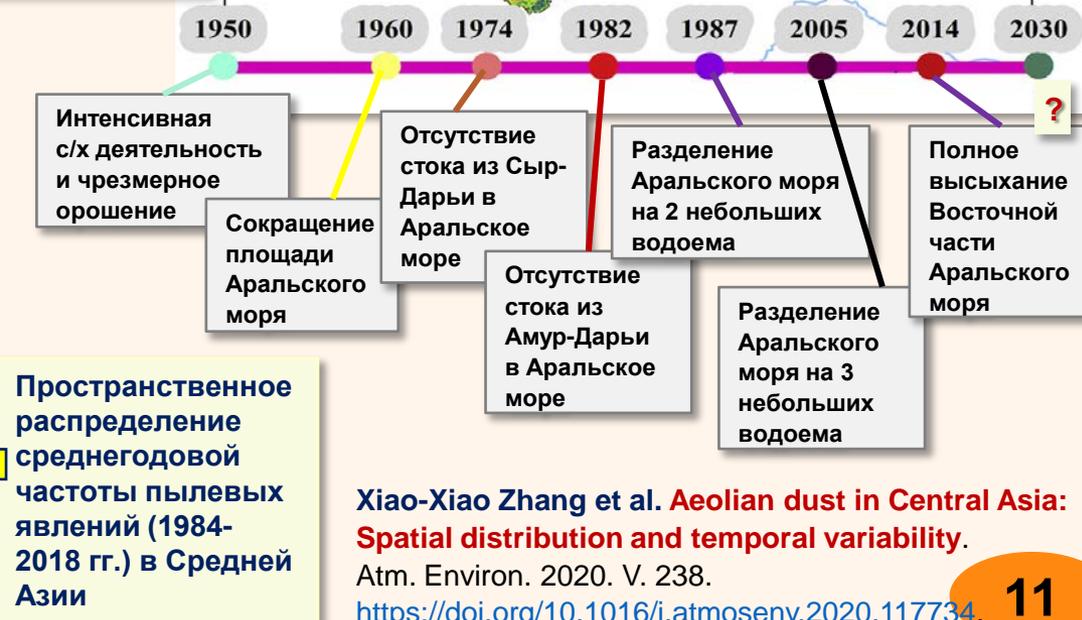
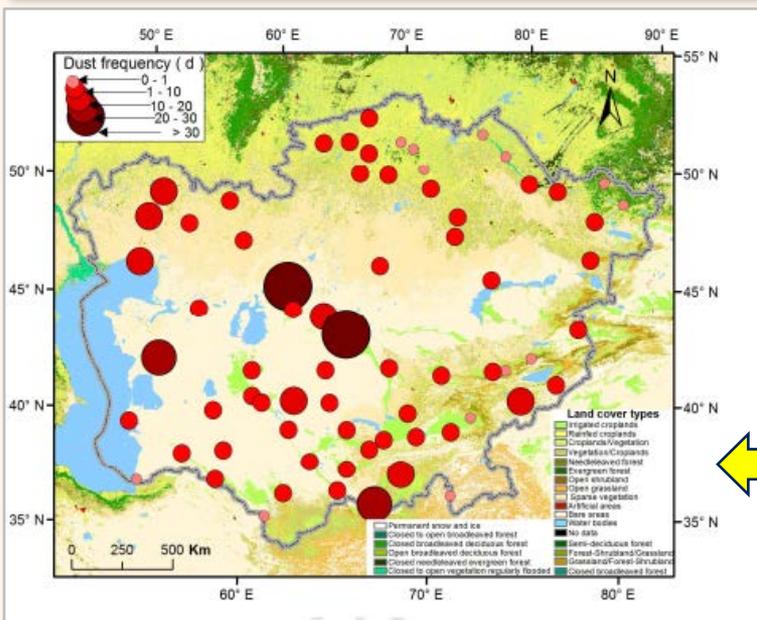
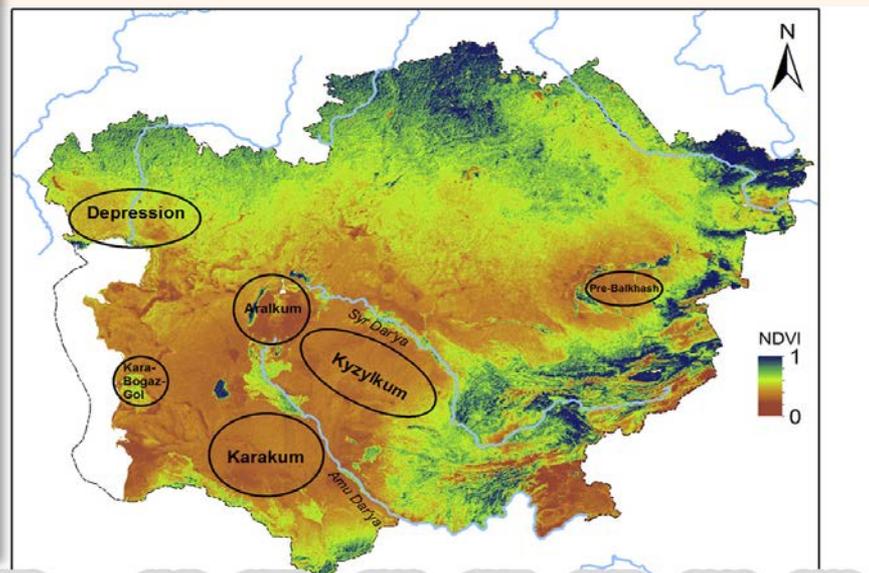


Статистика явлений пыльных бурь в субъектах юга ЕЧР (%)



**Золотая пыль в Средней Азии** особенно **значительна в засушливом регионе Приаралья**, где **среднегодовая частота пылевых явлений достигала 56 дней в период с 1984 по 2018 год**. В «пылевой» погоде в Средней Азии преобладали **пыльные ветры и интенсивные пыльные бури**, что влияет на региональные экосистемы и здоровье населения. **Пыльные явления** часто происходили в пустыне Аралкум, пустыне Кызылкум, Прикаспийской низменности, Кара-Богаз-Голе и в целом вдоль южных и юго-восточных границ Средней Азии в **весенний, летний и осенний сезоны**. Эти события приводили как к **высокой концентрации твердых взвешенных частиц (PM)** и **высокой скорости осаждения пыли**. Частота пылевых явлений в районе пустыни Аралкум, Прикаспийской низменности и региона Кара-Богаз-Гол с 1980–2010-х годов постепенно **увеличивается**.

## Источники эмиссии пыли в Средней Азии и хронология процесса опустынивания



Xiao-Xiao Zhang et al. **Aeolian dust in Central Asia: Spatial distribution and temporal variability.**

Atm. Environ. 2020. V. 238.

<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117734>

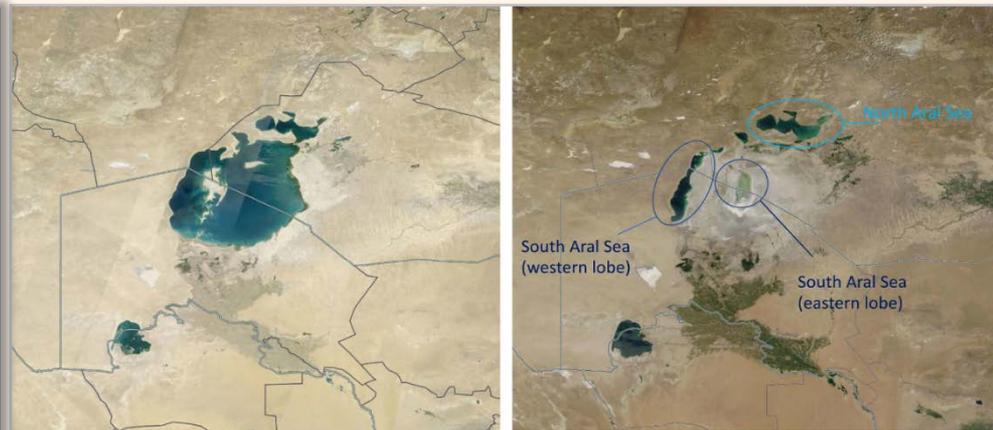
# ИСТОЧНИКИ ЭМИССИИ ПЫЛИ В СРЕДНЕЙ АЗИИ (2/3)



Экологическая катастрофа, связанная с пересыханием Аральского моря, привела к образованию **новой пустыни – Аралкум («Аральская пустыня»)**, которая в настоящее время имеет размеры **245 × 245 км** в поперечнике.

Почвы Аралкума загрязнены сельскохозяйственными химикатами с близлежащих пахотных земель, что делает Аралкум одной из основных региональных угроз здоровью населения.

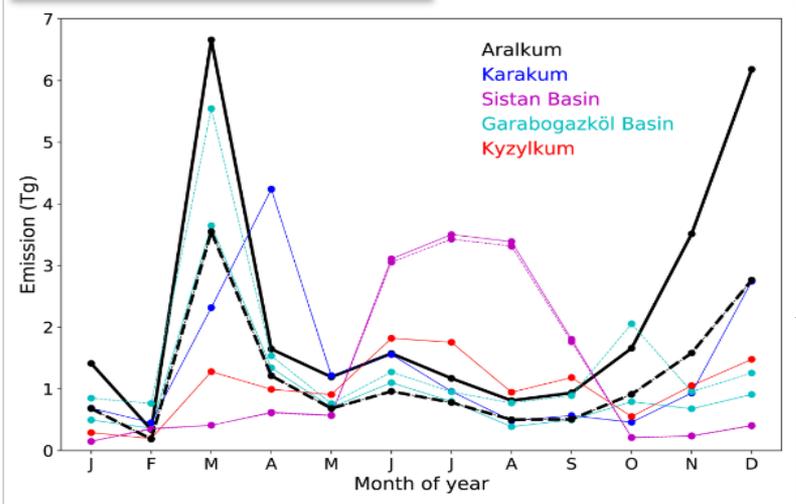
**Аралкум – новый интенсивный источник эмиссии атмосферной пыли**, способной переноситься ветром на дальние расстояния.



Дно высохшего Аральского моря

Полноцветные спутниковые снимки Аральского моря, сделанные Landsat в 1986 году (слева) и Terra MODIS 28 июля 2015 года (справа). В южной части моря максимальная ширина в 1980-х годах составляла  $\approx 220$  км, а к 2010-м годам максимальная ширина западной части Южного Аральского моря составила  $\approx 30$  км. Снимки заимствованы из работы:

Banks, J. R., Heinold, B., & Schepanski, K. **Impacts of the desiccation of the Aral Sea on the Central Asian dust life-cycle.** Journal of Geophysical Research. 2022. Atmospheres, 127, <https://doi.org/10.1029/2022JD036618>



**Общий объем выбросов пыли в регионе Средней Азии в прошлом – 180.3 Тг, в настоящем – 187.3 Тг.**

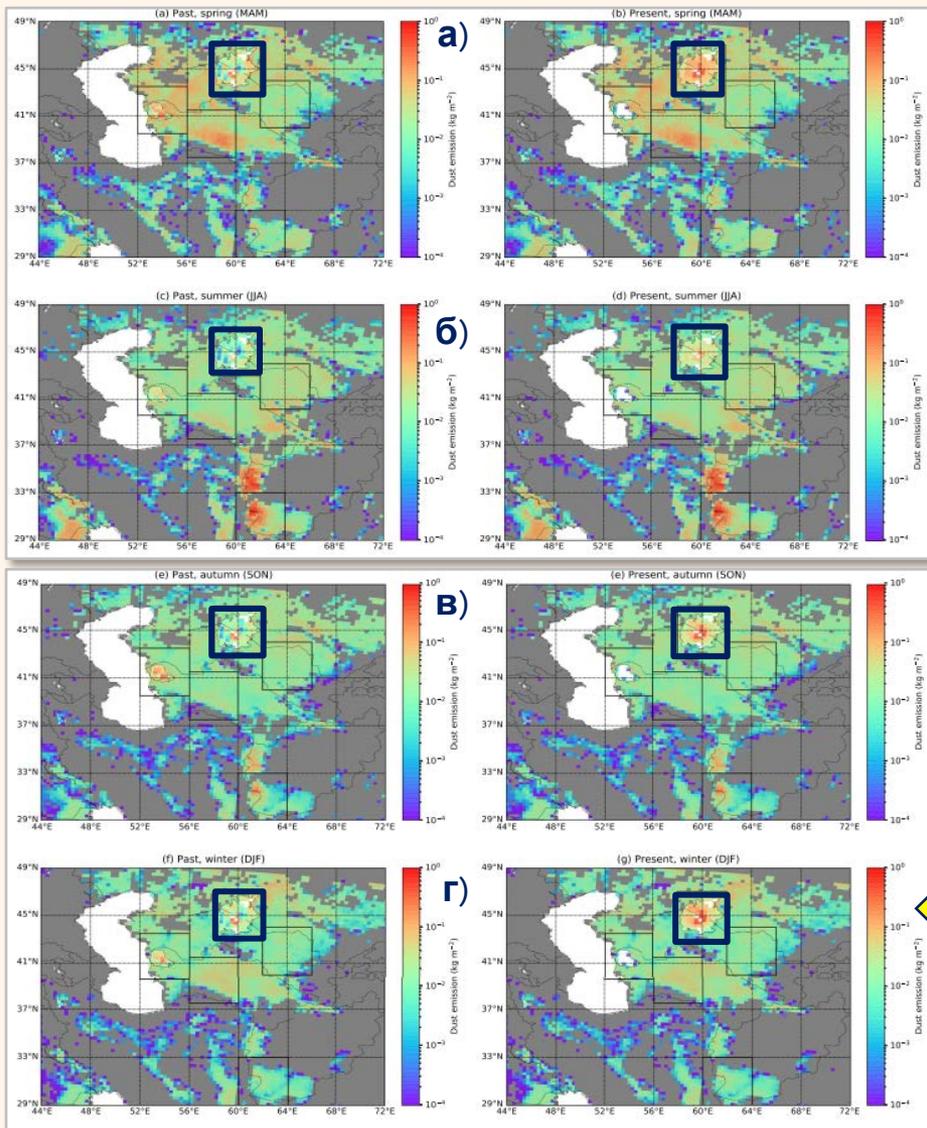


Ежемесячная эмиссия пыли в 5-ти регионах Средней Азии: молодая пустыня Аралкум (границы территории 43°-47° с.ш. и 58°-62° в.д.), старая пустыня Каракумы (37,5°-41,5° с.ш., 56°-60° в. д.), бассейн Систана (восток Ирана, запад Афганистана, 29°-33° с.ш., 60°-64° в.д., Кара-Богаз-Гол (39,5°-43,5° с.ш., 52°-56° в.д., старая пустыня Кызылкум (40°-44° с.ш., 62°-66° в.д.). Пунктирные линии указывают на прошлые выбросы, сплошные линии - на современные.

# ИСТОЧНИКИ ЭМИССИИ ПЫЛИ В СРЕДНЕЙ АЗИИ (3/3)



## Численные оценки эмиссии пыли во время пыльных бурь Средней Азии, включая Аралкум



**Результаты численного моделирования с использованием спутниковых данных (модель COSMO-MUSCAT):**

**Количество пыли над Средней Азией за счет эмиссии с территории новой пустыни Аралкум, в среднем ежегодно увеличивается на 7 %.**

**Неопределенность оценок** связана с неточностью регистрируемых спутниками данных **из-за густого облачного покрова, связанного с сильным ветром**, скрывающего более 2/3 пыли от космической аппаратуры.

Из **27.1 Тг** моделируемых выбросов Аралкума за год: **18.5 Тг (т.е. 68%)** приходится на **облачное небо с облачностью >95%**. При **ясном небе и облачности менее 5%** в атмосферу выбрасывается только **4.5 Тг**.

**Направления эмиссии «Аралкумской» пыли** из года в год различны из-за сильной межгодовой изменчивости ветрового режима. Однако **14,5 Тг** приходится на **западные ветры**.

Карты сезонных суммарных выбросов пыли в Средней Азии по результатам численного моделирования по сценариям прошлого /1980-е – 1990-е гг./ (слева) и современного /2000-е – 2010-е гг./ (справа).

По современному сценарию общая эмиссия пыли в Средней Азии:

**Весной – 32.4%; летом – 31.8%; осенью – 17.4%; зимой – 18.3%.**

Общий объем выбросов по сценарию прошлого – **180.3 Тг**, в настоящее время -**187.3 Тг**; для **пустыни Аралкум (черный квадрат): 14.3 и 27.1 Тг** соответственно

**Пыльный (песчаный) позёмок:** перенос пыли (частиц почвы, песчинок) ветром с земной поверхности в слое высотой 0.5-2 м, не приводящий к заметному ухудшению видимости (если нет других атмосферных явлений, горизонтальная видимость на уровне 2 м составляет 10 км и более). Возникает обычно при сухой поверхности почвы и скорости ветра 6-9 м/с и более.

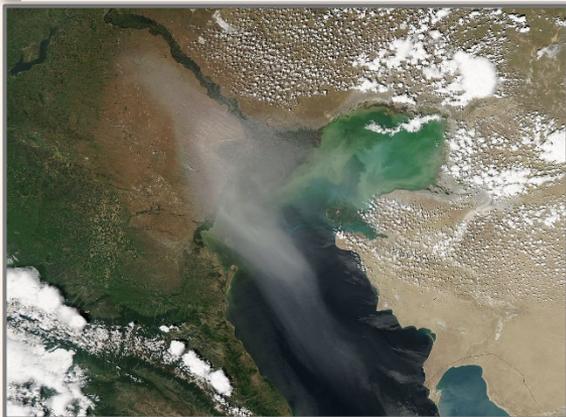
**Пыль (взвешенная в воздухе), пыльная мгла:** сплошное более-менее однородное помутнение атмосферы с горизонтальной дальностью видимости на уровне 2 м от 1 до 9 км (иногда видимость снижается до нескольких сотен и даже до нескольких десятков метров) за счёт взвешенной в воздухе пыли и частиц почвы. Может наблюдаться перед пыльной бурей или после неё (при ослаблении ветра), а также при отдалённой пыльной буре, когда поднятые в воздух пылинки переносятся ветром на большое расстояние. При этом в видимой окрестности нет признаков подъёма пыли ветром с поверхности земли. В зависимости от цвета почвы в данном регионе, отдалённые предметы приобретают сероватый, желтоватый или красноватый оттенок.

**Пыльные (песчаные) вихри:** вихревое движение воздуха, возникающее у поверхности земли днём в малооблачную (обычно жаркую) погоду при сильном прогреве земной поверхности солнечными лучами. Вихрь имеет вертикальную (или слегка наклонённую к горизонту) ось вращения, высота вихря составляет обычно 10-20 м (в ряде случаев несколько десятков метров), диаметр 1-5 м, время существования - от нескольких секунд до 1-2 минут. Вихрь поднимает с поверхности земли пыль, песок, камешки, мелкие предметы и переносит их иногда на значительное расстояние (сотни метров). Вихри проходят узкой полосой, так что непосредственно на метеостанции ветер может быть слабым, но фактически внутри вихря скорость ветра достигает 8-10 м/с и более. Горизонтальная видимость на уровне 2 м составляет 10 км и более.



**Пыльная (песчаная) буря** — атмосферное явление в виде переноса больших количеств пыли (частиц почвы, песчинок) ветром с земной поверхности в слое высотой несколько метров со значительным ухудшением горизонтальной **видимости** (обычно на уровне 2 м она составляет от 1 до 9 км, но в ряде случаев может снижаться до нескольких сотен и даже до нескольких десятков метров; чаще всего **дальность видимости** при пыльной (пылевой) буре составляет **менее 1000 м**. Небо, как правило, не видно. Вертикальная видимость измеряется по прибору). При этом наблюдается подъём пыли (песка) в воздух и одновременно оседание пыли на большой территории. В зависимости от цвета почвы в данном регионе, отдалённые предметы приобретают сероватый, желтоватый или красноватый оттенок.

**Причиной возникновения пыльных и песчаных бурь** являются **условия атмосферной циркуляции**, обеспечивающие возникновение продолжительных сильных ветров над пустынными территориями.



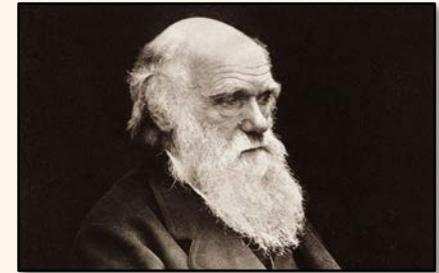
Пыльная буря над каспийским морем

<http://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/view.php?id=83721>

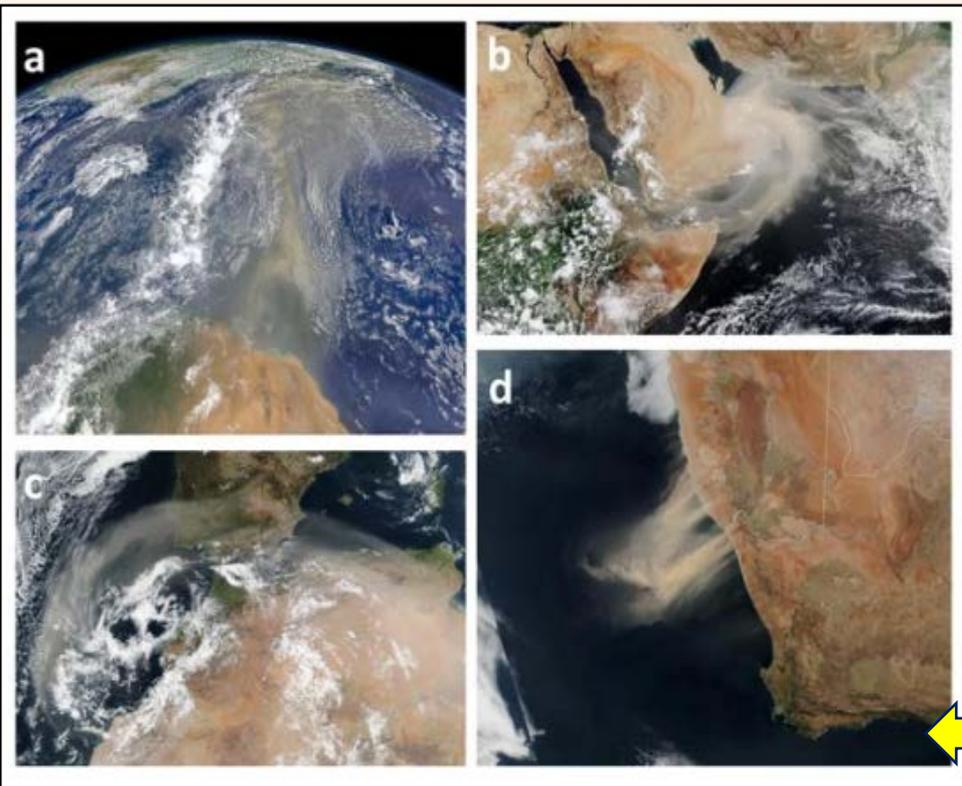
**Пыльная буря** обычно возникает **внезапно в виде** **надвижения высокой и широкой стены пыли**, при **сухой поверхности почвы и скорости ветра 10 м/с и более**, чаще всего — в **пустынных и полупустынных зонах** (ранней весной, после малоснежной зимы и засушливой осени, иногда — зимой в сочетании с метелями), реже — в степных, очень редко — в лесостепных и лесных (летом при сильной засухе) регионах. Впереди стены пыли нередко возникают пылевые вихри и наблюдается жаркая погода.

Помимо «собственно» пыльной бури, в ряде случаев **пыль из пустынь и полупустынь может длительное время удерживаться в атмосфере и достичь почти любой точки мира в виде пыльной мглы**.

О первых признаках переноса аэрозолей минеральной пыли на большие расстояния через Атлантический океан сообщил Чарльз Дарвин в 1846 году (Darwin, 1846). Только в начале 1970-х годов, примерно через 120 лет спустя, получены первые количественные данные о переносе минеральной пыли на большие расстояния через Атлантический океан в результате наземного мониторинга состава аэрозолей на Барбадосе, который показал, что африканская пыль обычно достигает Карибского региона на расстоянии **5000 км** (Delany et al., 1967).



Чарльз Роберт Дарвин  
(Charles Robert Darwin)  
1809 — 1882



(<https://worldview.earthdata.nasa.gov>).

JUNE 4, 1845.

The following communications were read:—

1. *An account of the FINE DUST which often falls on Vessels in the ATLANTIC OCEAN.* By CHARLES DARWIN, Esq., F.R.S., F.G.S.

MANY scattered accounts have appeared concerning the dust which has fallen in considerable quantities on vessels on the African side of the Atlantic Ocean. It has appeared to me desirable to collect these accounts, more especially since Professor Ehrenberg's remarkable discovery that the dust consists in considerable part of Infusoria and

1845.] DARWIN ON DUST IN THE ATLANTIC. 27

Phytolitharia. I have found fifteen distinct statements of dust having fallen; and several of these refer to a period of more than one day, and some to a considerably longer time. Other less distinct accounts have also appeared. At the end of this paper I will give the particular cases, and will here only refer to the more striking ones and make a few general remarks.

The phenomenon has been most frequently observed in the neighbourhood of the Cape Verd Archipelago. The most southern point at which dust is recorded to have fallen is noticed by Capt. Hayward<sup>(1)</sup>, on whose vessel it fell whilst sailing from lat. 10° N. to 2° 56' N.; the distance from the nearest of the Cape Verd Islands being between 450 and 850 miles. Respecting the northern limit, the water for a great distance on both sides of C. North (in lat. 28° 45') is discoloured, owing in part, according to Lieut. Arlett<sup>(2)</sup>,

Видимые изображения пылевого шлейфа (Suomi NPP - VIIRS): (a) переносимого через Атлантический океан (04.07.2014.), (b) пыли над Аравийским морем (30.06.2018), (c) над Средиземноморским бассейном (21.02.2017); (d) у побережья Намибии (25.09.2019.).

**ПОМОХА**, помха ж. волжск. мгла, туман, горькая роса или пар, вредящий хлебу; от помохи бывает пустоколосье.

Помха, помеха, препятствие, препона; вред, бедственный случай.

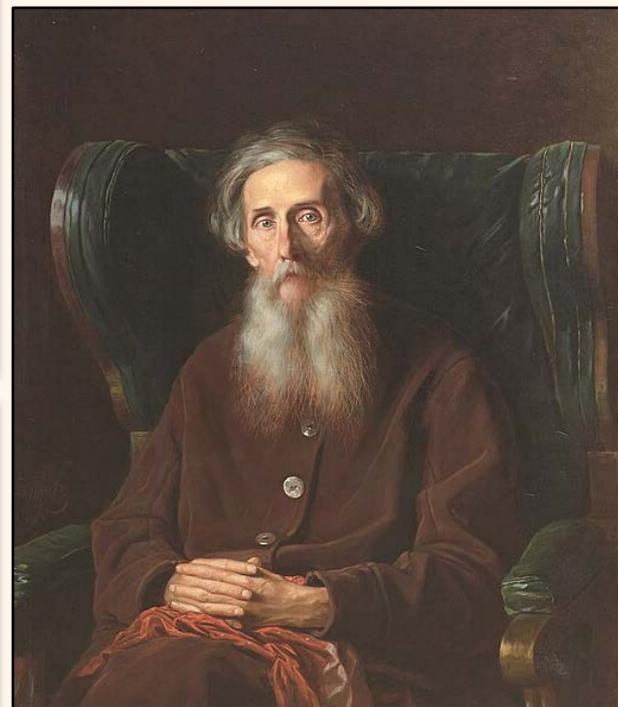
*В.И. Даль. Толковый словарь живого великорусского языка*

**ПОМОХА** – пыльная мгла, образующаяся от выдувания чернозема в степной полосе Русской равнины, вследствие переноса пыли ветром на громадные расстояния.

*Сельскохозяйственный словарь-справочник / Гл. ред. А.И. Гайстер. – М.-Л.: Государственное издательство колхозной и совхозной литературы «Сельхозгиз», 1934. 1280 с.*

**ПОМОХА** – Местное название мглы в засушливую летнюю погоду, часто при суховее, на юго-востоке ЕТС. (прим.: ЕТС – Европейская территория СССР)

*С.П. Хромов, Л.И. Мамонтова. Метеорологический словарь. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 569 с.*



Владимир Иванович Даль  
(1801-1872)

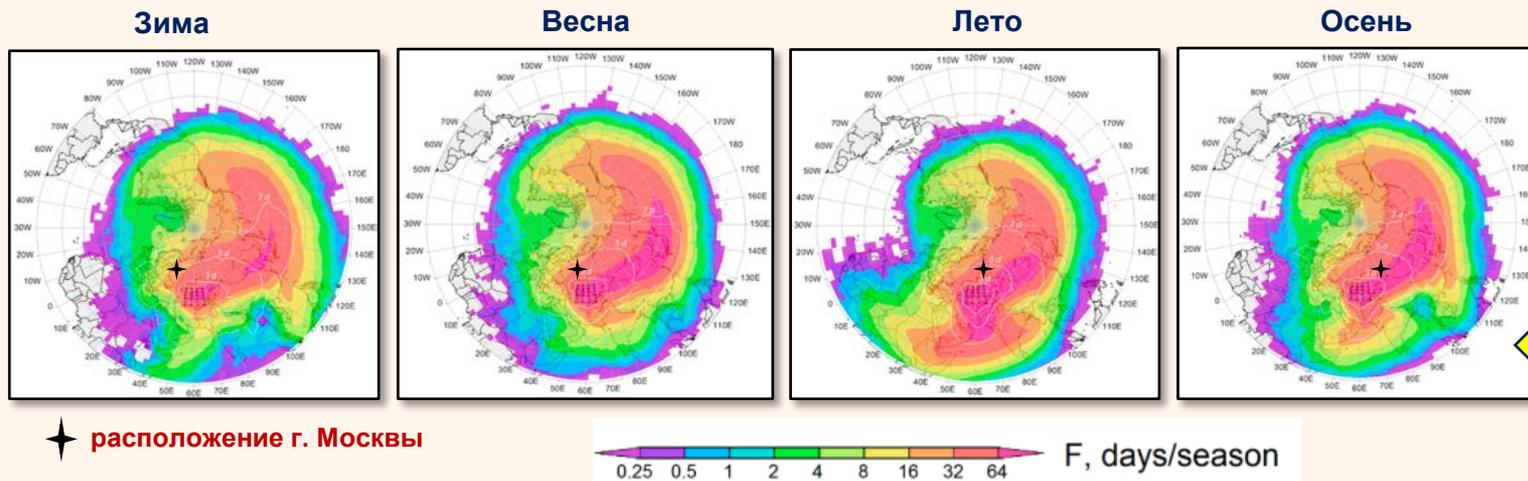
Портрет работы В.Г. Перова (1872)



# ПЕРЕНОС ВОЗДУШНЫХ МАСС ИЗ АРАЛО-КАСПИЙСКОГО РЕГИОНА В РАЙОНЫ ЕЧР

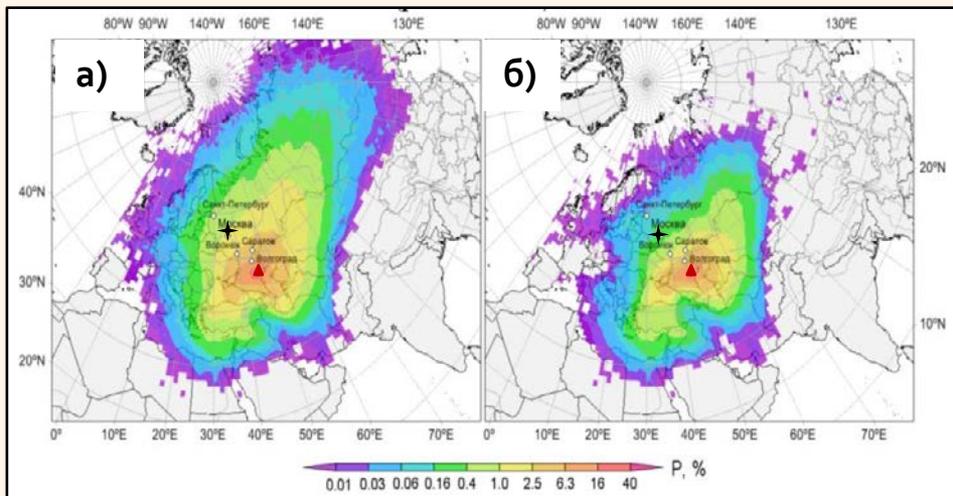


Средняя сезонная повторяемость переноса воздушных масс (шкала логарифмическая) из всей нижней тропосферы, F [дни/сезон], из Арало-Каспийского аридного региона (по данным CALIOP за 2006–2021 гг.)



Черными точками обозначены начальные точки прямых траекторий; концентрические белые линии ограничивают средние зоны переноса воздушных масс в течение первых 3, 5 и 7 дней; разрешение карты:  $2^\circ \times 2^\circ$ .

Плотность вероятности переноса воздушных масс из опустыненного района (отмечен красным треугольником) Калмыкии и Астраханской обл. (массив данных 1986-2016 гг.)



(а) - для всего столба атмосферы над ячейкой размером  $1^\circ \times 1^\circ$ ,  
(б) - для слоя перемешивания

Вероятность переноса (PM) воздушных масс из засушливых зон юга ЕЧР в Московский регион	3-4 % (на начальных высотах 0.1 и 1 км)
Квазипериодические вариации PM	4-6 лет (0.1 и 1 км)
Экстремумы PM (0.1 км)	январь-февраль (max), июнь-август (min)
Средняя продолжительность переноса	67 ч (0.1 км), 53 ч (1 км)
Максимум продолжительности переноса	58 ч (май-август; 1 км); 72 ч (май-сентябрь, 0.1 км)
Минимум продолжительности переноса	февраль (0.1 и 1 км)

Shukurov, K.A.; Simonenkov, D.V.; Nevzorov, A.V.; et al. CALIOP-Based Evaluation of Dust Emissions and Long-Range Transport of the Dust from the Aral-Caspian Arid Region by 3D-Source Potential Impact (3D-SPI) Method. *Remote Sens.* 2023, 15, 2819. <https://doi.org/10.3390/rs15112819>

Shukurov K.A. and Chkhetiani O.G. Probability of transport of air parcels from the arid lands in the Southern Russia to Moscow region. *Proc. SPIE.* 2017. 10466. <https://doi.org/10.1117/12.2287932>

# ЭПИЗОДЫ ДАЛЬНЕГО АТМОСФЕРНОГО ПЕРЕНОСА ПЫЛИ ИЗ АРАЛО-КАСПИЙСКОГО РЕГИОНА В МОСКОВСКУЮ ОБЛАСТЬ (по данным наблюдений в ИФА РАН и на станциях ГПБУ «Мосэкомониторинг»)



За период с 2011 – по 2024 гг. выявлено **9 эпизодов дальнего переноса пыли** в Московский регион (длительностью 3-11 суток), обуславливающие **рост массовой концентрации приземного аэрозоля PM<sub>10</sub>**, в том числе с **превышением среднесуточной ПДК (60 мкг/м<sup>3</sup>)**.  
Как правило, такие эпизоды сопровождались **антициклоном, штилем/тихим ветром, сухой и часто жаркой погодой**, т.е. **неблагоприятными метеорологическими условиями (НМУ)**, способствующими накоплению примесей в приземном воздухе.

Даты эпизода (ЭПИ) дальнего переноса пыли	Показатели за весь месяц					Показатели эпизода (ЭПИ)		
	Среднее	СКО	Макс	Макс/Сред	Среднее во время ЭПИ	Среднее без ЭПИ	ЭПИ / без ЭПИ	Длительность эпизода, сут.
24-28 июля 2011	32	8	47	1.5	42	30	1.4	5
18-22 апреля 2014	39	23	<b>90</b>	2.3	<b>77</b>	32	2.4	5
<b>30 марта-2 апреля 2015</b>	52	52	<b>228</b>	4.4	<b>178</b>	41	<b>4.3</b>	4
7-10 апреля 2016	38	21	<b>102</b>	2.7	<b>71</b>	33	2.2	4
25-29 марта 2020	38	25	<b>113</b>	2.9	<b>84</b>	30	2.8	5
<b>7-14 октября 2020</b>	44	28	<b>137</b>	3.1	<b>77</b>	26	<b>3.0</b>	<b>8</b>
2-12 декабря 2020	22	10	43	2.0	32	16	2.0	<b>11</b>
<b>13-15 декабря 2023</b>	16	12	59	3.8	47	12	<b>3.8</b>	3
16-19 марта 2024	36	21	<b>97</b>	2.7	<b>74</b>	30	2.5	4

Gubanova D., Chkhetiani O.G., Vinogradova A.A. et al. Atmospheric transport of dust aerosol from arid zones to the Moscow region during fall 2020. *AIMS Geosciences*. 2022. 8(2): 277-302. <https://doi.org/10.3934/geosci.2022017>

Gubanova D.P., Vinogradova A.A., and Kotova E.I. Long-Range Atmospheric Transport of Dust from the Caspian Sea Region to the Arctic Zone of the European Part of Russia in December 2023. *Doklady Earth Sciences*. 2024. <https://doi.org/10.1134/S1028334X24602852>

# ИСТОРИЯ ВОПРОСА: НЕКОТОРЫЕ ПУБЛИКАЦИИ О ПЕРЕНОСЕ ВОЗДУШНЫХ МАСС И ПЫЛИ ИЗ АРАЛО-КАСПИЙСКОГО РЕГИОНА В РАЙОНЫ ЕЧР



Шевченко В.П., Коробов В.Б., акад. Лисицын А.П. и др. **Первые данные о составе пыли, окрасившей снег на европейском севере России в желтый цвет (март 2008 г.).** ДАН. 2010. Т. 431, № 5. С. 675–679.

Романовская А.Ю., Савин И.Ю. **Аэрозольная пыль почвенного происхождения в атмосфере: источники, количество, свойства (обзор).** Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2021. Вып. 109. С. 36-95.  
<https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-109-36-95>

Shukurov, K.A., Simonenkov, D.V., Nevzorov, A.V., et al. **CALIOP-Based Evaluation of Dust Emissions and Long-Range Transport of the Dust from the Aral–Caspian Arid Region by 3D-Source Potential Impact (3D-SPI) Method.** *Remote Sens.* 2023. V. 15, 2819. <https://doi.org/10.3390/rs15112819>

Shukurov K.A. and Chkhetiani O.G. **Probability of transport of air parcels from the arid lands in the Southern Russia to Moscow region.** *Proc. SPIE.* 2017. 10466. <https://doi.org/10.1117/12.2287932>

Шукуров К.А., Шукурова Л.М. **Регионы-источники нитрата аммония, сульфата аммония и природных силикатов в приземном аэрозоле Западного Подмосковья.** *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2017. Т. 53. № 3. С. 360-369.  
<https://doi.org/10.7868/s0002351517030142>

Шукуров К.А., Постыляков О.В., Боровский А.Н. и др. **Исследование переноса атмосферных примесей и температурных аномалий траекторными методами в ИФА им. А.М. Обухова РАН.** В сб. *Турбулентность. динамика атмосферы и климата. материалы международной конференции.* 2018. С. 437-446.

Gubanova D., Chkhetiani O.G., Vinogradova A.A. et al. **Atmospheric transport of dust aerosol from arid zones to the Moscow region during fall 2020.** *AIMS Geosciences.* 2022. 8(2): 277-302. <https://doi.org/10.3934/geosci.2022017>

Виноградова А.А., Губанова Д.П., Иорданский М.А., Скороход А.И. **Влияние метеорологических условий и дальнего переноса воздушных масс на состав приземного аэрозоля в Москве в зимние сезоны.** *Оптика атмосферы и океана.* 2022. Т. 35. № 06. С. 436–446. <https://doi.org/10.15372/AOO20220602>

Виноградова А.А., Губанова Д.П., Лезина Е.А., Иванова Ю.А. **Пылевой аэрозоль из районов Северного Прикаспия в приземном воздухе центра европейской России.** *Оптика атмосферы и океана.* 2024. Т. 37. № 6 (425). С. 453-460.  
<https://doi.org/10.15372/AOO20240602>

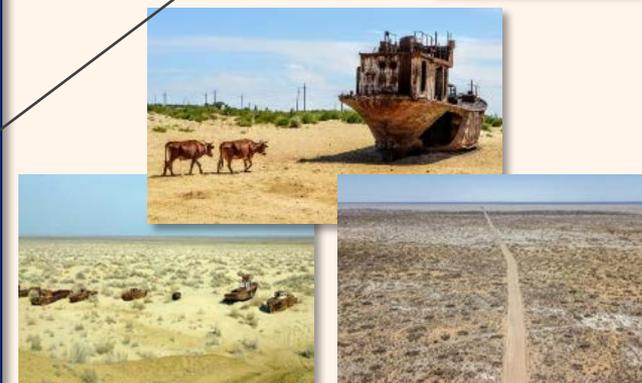
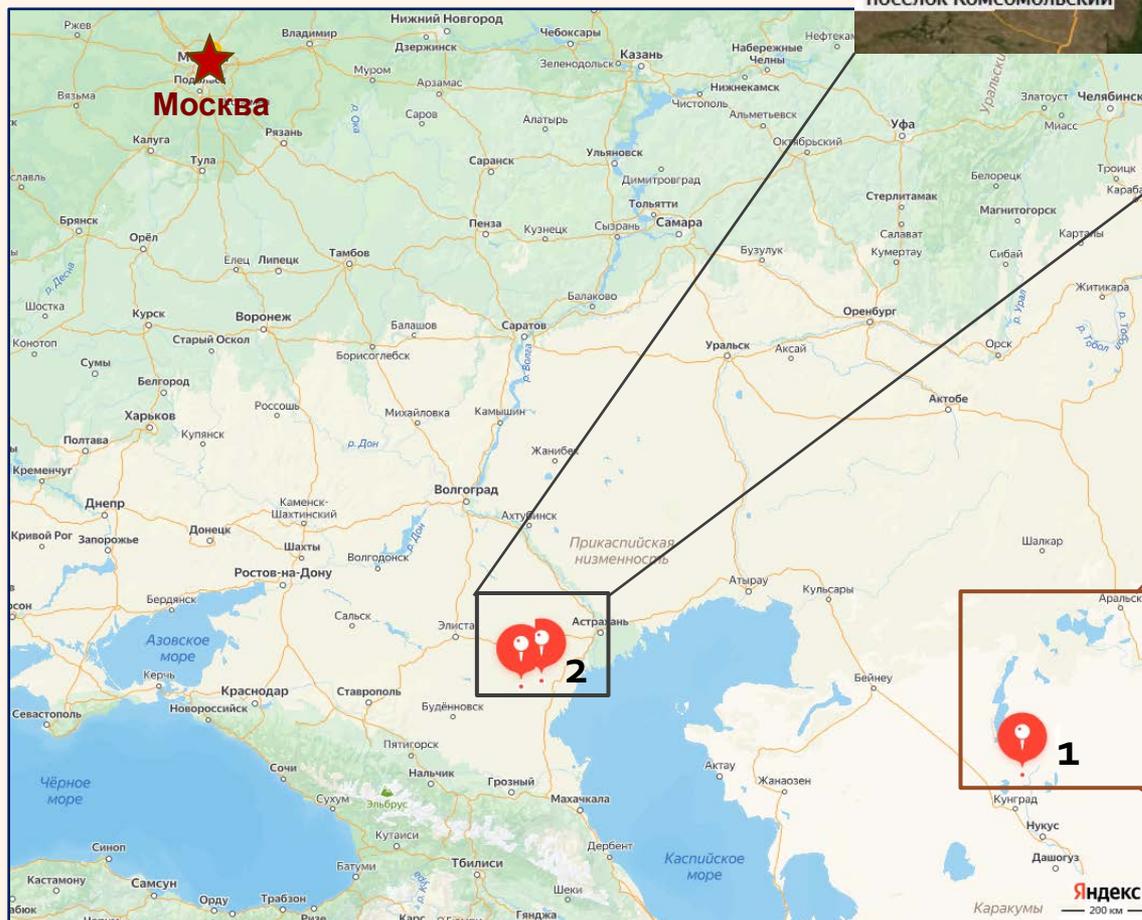
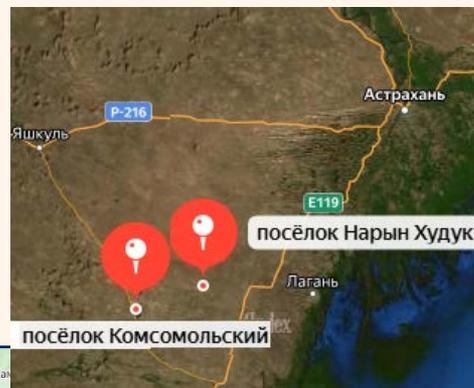
Gubanova D.P., Vinogradova A.A., and Kotova E.I. **Long-Range Atmospheric Transport of Dust from the Caspian Sea Region to the Arctic Zone of the European Part of Russia in December 2023.** *Doklady Earth Sciences.* 2024.  
<https://doi.org/10.1134/S1028334X24602852>

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЫЛЕВОГО АЭРОЗОЛЯ В АРАЛО-КАСПИЙСКОМ РЕГИОНЕ: СХЕМА РАСПОЛОЖЕНИЯ ПУНКТОВ НАБЛЮДЕНИЙ



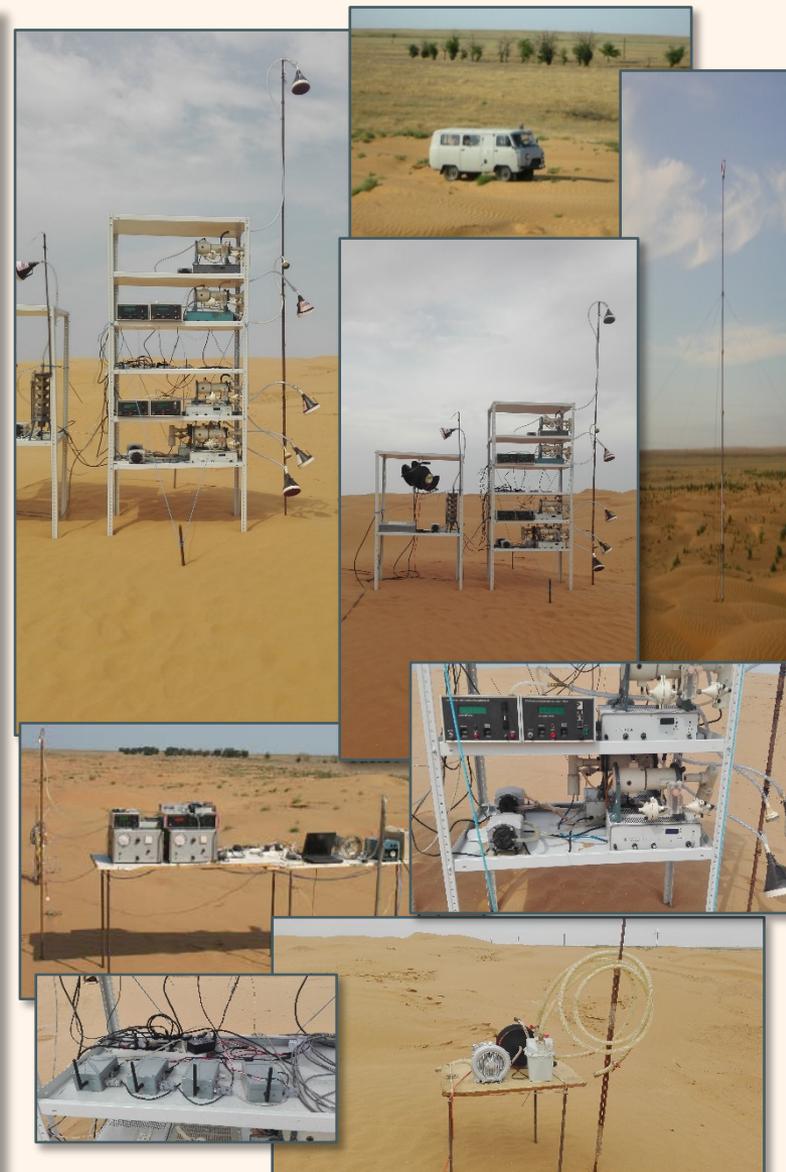
## Пункты наблюдения:

- 1) **вблизи пос. Муйнак (высохшее дно Аральского моря, Южное Приаралье, Каракалпакстан, Респ. Узбекистан),**
- 2) **вблизи пос. Нарын-Худук и пос. Комсомольский (опустыненные территории сухостепной зоны, Черноземельский р-н, Респ. Калмыкия).**



# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЫЛЕВОГО АЭРОЗОЛЯ В АРАЛО-КАСПИЙСКОМ РЕГИОНЕ: ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА

- **аспирационные пробоотборники** для забора аэрозольных проб на аналитические фильтры типа АФА (расход  $12 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) с последующим гравиметрическим и химическим анализом;
- **6-ти каскадные импакторы**, снаряженные гидрофобными фильтрами, для определения массового фракционного и элементного состава аэрозольных частиц в спектральных каналах: 1 –  $> 6.5 \text{ мкм}$ ; 2 –  $4.0\text{-}6.5 \text{ мкм}$ ; 3 –  $2.5\text{-}4.0 \text{ мкм}$ ; 4 –  $1.5\text{-}2.5 \text{ мкм}$ ; 5 –  $0.5\text{-}1.5 \text{ мкм}$ ; 6 –  $< 0.5 \text{ мкм}$ ;
- **аэрозольные спектрометры типа ЛАС-ПК и ЛАС-П** для определения счетной концентрации и распределения по размерам частиц (диапазон размеров частиц  $0.15 \div 2 \text{ мкм}$  при концентрации до  $2 \cdot 10^3 \text{ частиц/см}^3$ , 10 каналов измерений);
- **оптико-электронные аэрозольные счетчики типа ОЭАС-05** для определения счетной концентрации и распределения по размерам частиц ( $d = 0.2 \div 5 \text{ мкм}$  при концентрации до  $10^3 \text{ частиц/см}^3$ , 10 каналов измерений);
- **модифицированные аэрозольные фотометры типа “Sinclair-Phoenix”** для определения массовой концентрации частиц пыли и дыма ( $d = 0.05 \div 40 \text{ мкм}$ , диапазон концентраций  $1.0 \div 100 \text{ мкг/м}^3$ );
- **модифицированные аэрозольные спектрометры типа ROYCO, мод. 220** (для определения счетной концентрации и распределения по размерам частиц ( $d = 0.5 \div 15 \text{ мкм}$  при концентрации до  $2 \cdot 10^3 \text{ частиц/см}^3$ , 11 каналов измерений);
- **стандартные средства измерения метеорологических параметров.**



- ❑ определение микрофизических параметров (дисперсного состава и счетной концентрации) и массовой концентрации аэрозольных частиц **оптическими методами** (аэрозольные спектрометры, счетчики, нефелометры);
- ❑ определение массовой концентрации частиц **гравиметрическим методом**;
- ❑ отбор проб аэрозолей на аналитические фильтры АФА-ХА-20 на высоте 2.0 м над уровнем земли полевым аспирационным пробоотборником с расходом 12 м<sup>3</sup>/ч по методике определения массового содержания микроэлементов в атмосферных аэрозолях природных ландшафтов с последующим **элементным анализом методами масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS), атомно-эмиссионной масс-спектропии (ICP-AES), рентгенофлуоресцентного анализа (РФА)**;
- ❑ отбор проб поверхностного слоя почв исследуемых ландшафтов (опустыненных территорий и высохшего дна Аральского моря) с последующим **элементным анализом (для илистой фракции, размер частиц < 1 мм) методом РФА**.

Для выявления источников аэрозольных частиц и оценки степени дифференциации элементов в аэрозолях и почвах рассчитаны:

коэффициенты обогащения элементов (Enrichment Factor – **EF**) в пробе аэрозолей или почвы (sample) по сравнению со средним составом земной коры (crust):  $EF_X = \frac{(C_X/C_{Al})_{sample}}{(C_X/C_{Al})_{crust}}$ ,

кларки концентрации элементов в почве (**КК**):  $КК = \frac{C_{Xs}}{K}$ ,

коэффициенты аэрозольной концентрации (**КК<sub>a</sub>**):  $КК_a = \frac{C_{Xa}}{K}$ ,

коэффициенты локальной аэрозольной концентрации (**КК<sub>as</sub>**):  $КК_{as} = \frac{C_{Xa}}{C_{Xs}}$ .

где  $C_X$  и  $C_{Al}$  – концентрация химического элемента  $X$  и алюминия (Al) – опорного элемента почвенного происхождения;  $C_{Xs}$  – концентрация химического элемента  $X$  в почве,  $K$  – кларк элемента  $X$  в гранитном слое земной коры,  $C_{Xa}$  – концентрация химического элемента  $X$  в твердой фазе аэрозолей.

# МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ СОСТАВ (%) ПОЧВ ЛАНДШАФТОВ ЮЖНОГО ПРИАРАЛЬЯ И КАЛМЫКИИ



Соединение	Тип почвы аридных ландшафтов					
	Южное Приаралье			Калмыкия		
	Эоловая пыль	Полупустыня	Высохшее дно Арала	Пески	Сухая степь	Солончак
SiO <sub>2</sub>	48.86	-	-	80.71	63.8	43.6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.93	46,37	33.01	6.395	6.559	4.3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.58	-	-	1.907	1.891	0.701
TiO <sub>2</sub>	1.33	-	-	0.295	0.287	0.14
CaO	2.66	8.11	4.55	0.918	0.726	2.199
MgO	2.99	3.88	7.13	0.657	0.591	0.729
MnO	-	-	-	0.031	0.03	0.009
K <sub>2</sub> O	4.58	0.12	0.12	1.924	1.937	1.259
Na <sub>2</sub> O	-	-	-	1.435	1.407	6.607
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.18	2.42	2.25	0.054	0.067	0.028
ZrO <sub>2</sub>	-	-	-	0.037	0.035	0.034
Другие микро- и макроэлементы в виде примесей	18.32	30.38	41.31	5.626	22.654	37.192



**Эоловая пыль Приаралья** обогащена Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, поступающим в атмосферу с осушенной поверхности донных почв, в которой происходит переход закисной формы железа (FeO) в окисную (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Полупустынные почвы и поверхностный слой высохшего дна Арала отличаются богатым содержанием оксида алюминия, что присуще **такырным глинистым почвам**. Достаточно большое количество **CaO, MgO, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>** в **полупустынных почвах и на высохшем дне Арала** свидетельствует об их принадлежности к **морским отложениям**.

**CaO** в солончаках Калмыкии содержится в несколько раз меньше, чем в почвах полупустынь и на высохшем дне Арала, что определяется литологией региона. **По своему валовому химическому составу почвы полупустынь в Приаралье близки к поверхностному грунту высохшего дна Арала**, а в **Калмыкии выявлена схожесть песков и почв сухой степи**.

**Идентичность минералогического состава почв фоновых и измененных ландшафтов Приаралья и Калмыкии обусловлена их общим генезисом. Минеральную часть почв и эоловой пыли** составляют **карбонаты, кварц, кальцит, полевошпат, слюда, доминирующими компонентами** которых являются **соединения кремния, алюминия, магния и кальция**. Кроме этих соединений, суммарное содержание которых, выраженное в оксидах, составляет выше 80 – 85 %, в состав почв входят в значительных количествах соединения, Na, K, Cl.

# ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПЕСЧАНОЙ ПОЧВЫ ОПУСТЫНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ КАЛМЫКИИ

Данные гранулометрического анализа образцов песчаной почвы природного заповедника «Чёрные земли» (Калмыкия), полученные при мокром осадении

Размер частиц, мкм	<1	1-3	3-5	5-10	10-20	20-50	50-250
Процентное содержание фракции, %	6.2	2.9	0.7	0.5	0.5	2.5	86.6

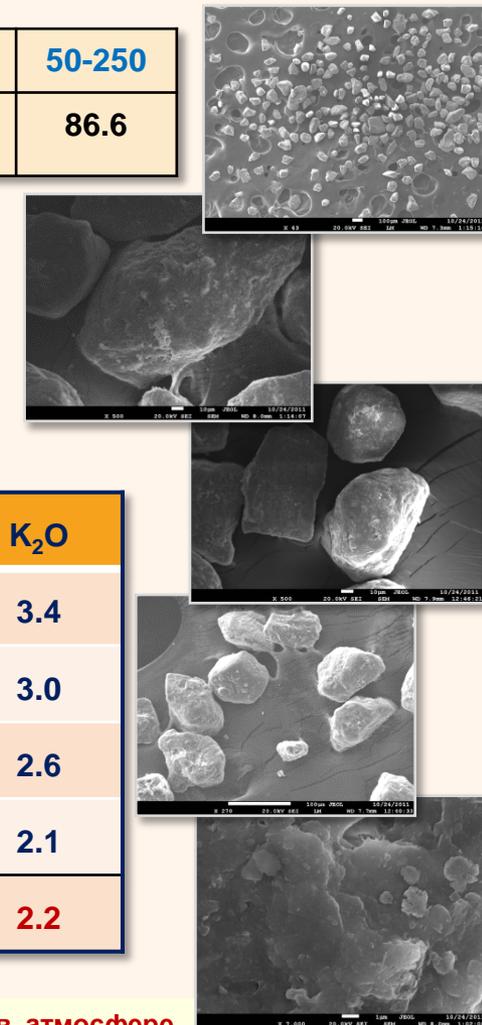
Преобладающая фракция – фракция мелкого песка, составляющая 86,6% от суммы фракций.

Фракция ила – 6.2%, тонкой пыли – 3.6% и средней пыли – 0.5%.

Исследуемые пески не засолены.

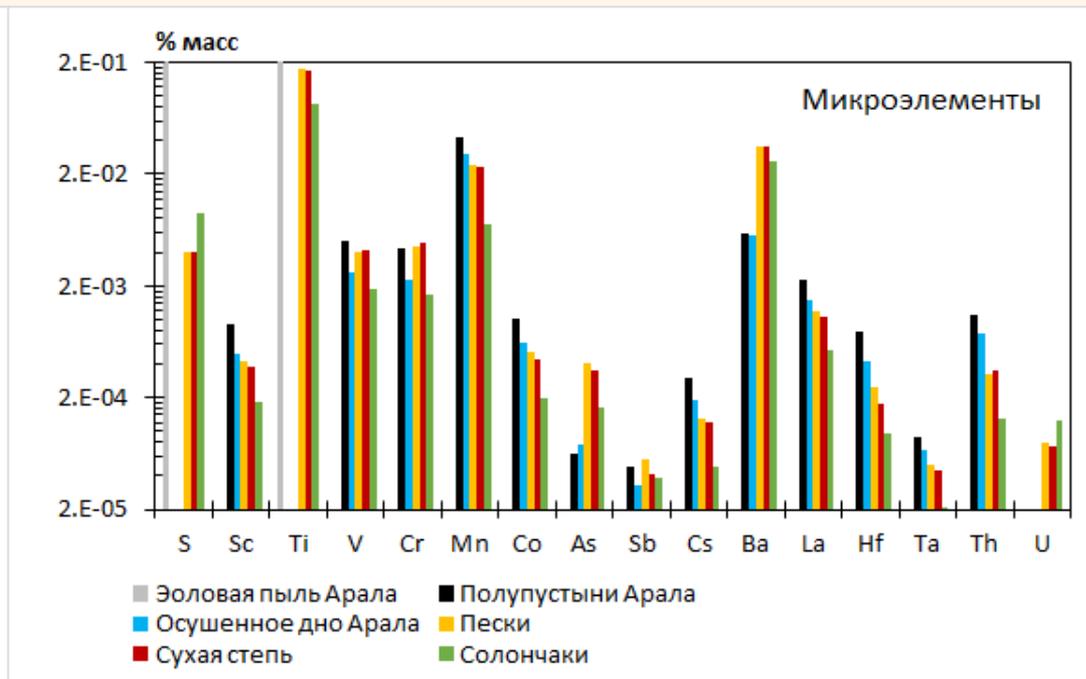
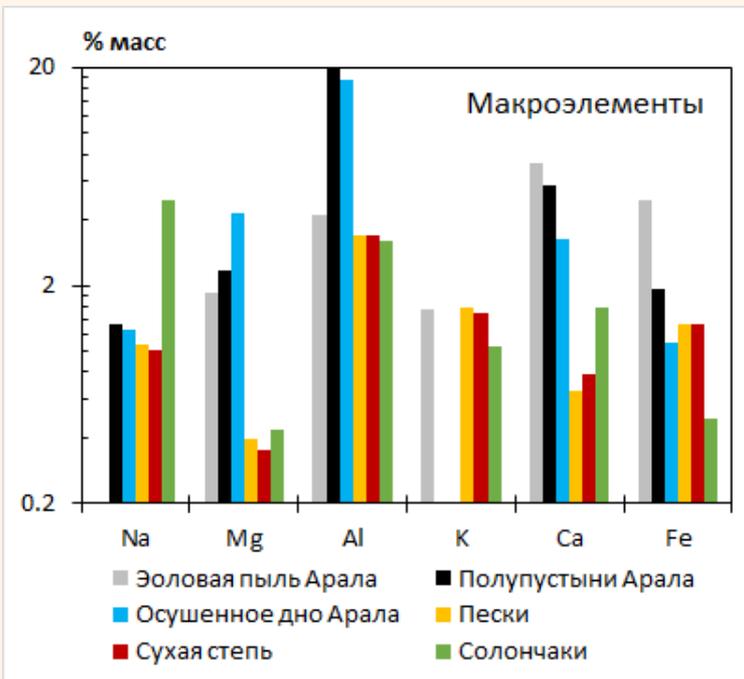
Содержание микроэлементов в песчаной почве Калмыкии  
и в выделенных из нее фракциях (мг/кг)

Размер, мкм	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	MnO	K <sub>2</sub> O
<1	59.7	19.5	12.3	1.0	0.4	2.7	0.1	3.4
1-5	67.8	15.7	7.5	1.0	1.1	3.0	0.1	3.0
5-10	70.9	14.5	6.7	1.2	1.2	2.3	0.1	2.6
>10	88.4	5.8	1.0	0.2	0.7	0.7	0.1	2.1
<b>образец в целом</b>	<b>80.7</b>	<b>10.1</b>	<b>2.5</b>	<b>0.3</b>	<b>1.5</b>	<b>1.8</b>	<b>0.1</b>	<b>2.2</b>



Губанова Д.П., Кудерина Т.М., Чхетиани О.Г. и др. Экспериментальные исследования аэрозолей в атмосфере семиаридных ландшафтов Калмыкии: 2. Ландшафтно-геохимический состав аэрозольных частиц. Геофизические процессы и биосфера. 2018.Т.17. № 3. С. 18-44. <https://doi.org/10.21455/GPB2018.3-2>

# ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ПОЧВ ЛАНДШАФТОВ ЮЖНОГО ПРИАРАЛЯ И КАЛМЫКИИ



## Различия (макроэлементы):

**Все почвы Приаралья** в значительной степени **обогащены алюминием**.

**Для Приаралья** характерно **хлоридное магний-кальциевое засоление** за счет близости морских вод.

**В солончаках Калмыкии** присутствует **континентальное хлоридно-натриевое засоление**.

## Различия (микроэлементы):

**Почвы Калмыкии** обогащены **мышьяком**, поступающим из неглубоко залегающей свиты майкопских глин.

**В почвах Приаралья** наблюдаются повышенные концентрации **многих литогенных элементов**, характеризующих данную геохимическую провинцию.

## Сходства (макроэлементы):

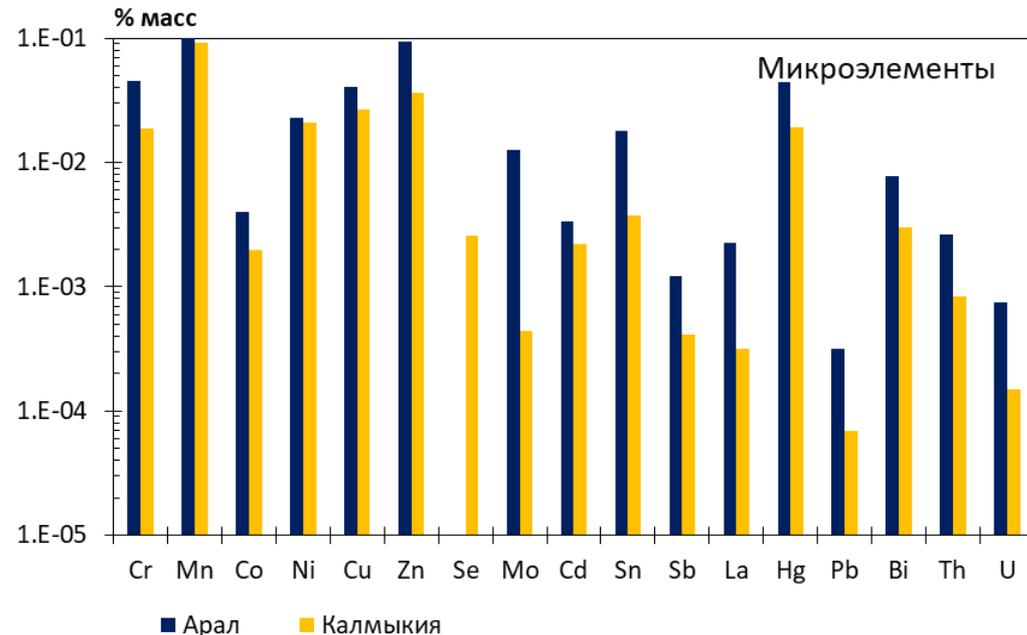
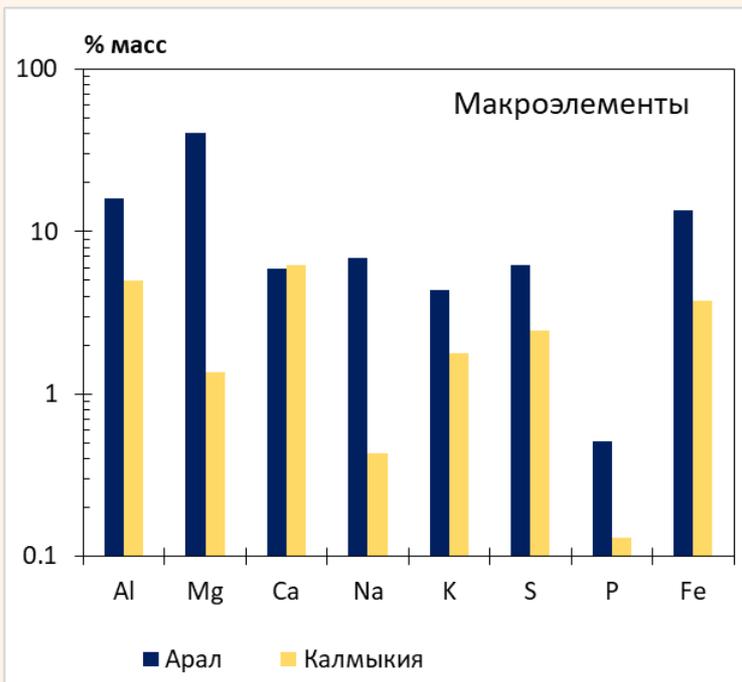
**Во всех типах ландшафтов** (за исключением солончаков в Калмыкии) выявлено **повышенное содержание железа**.

**Всем почвам** присуще значимое **содержание калия**.

**Элементный состав** позволяет **составить геохимический портрет** исследуемых ландшафтов.

**Особенности массового процентного распределения** в почвах ландшафтов Южного Приаралья и Калмыкии соотносятся с результатами валового химического состава.

# ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ АРИДНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ ЮЖНОГО ПРИАРАЛЬЯ И КАЛМЫКИИ



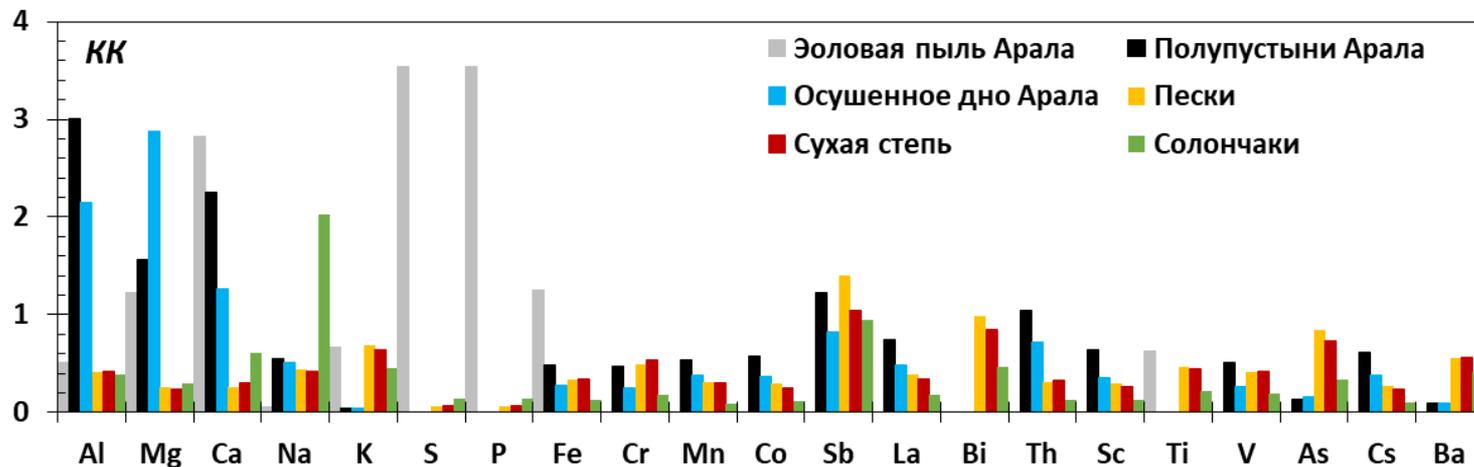
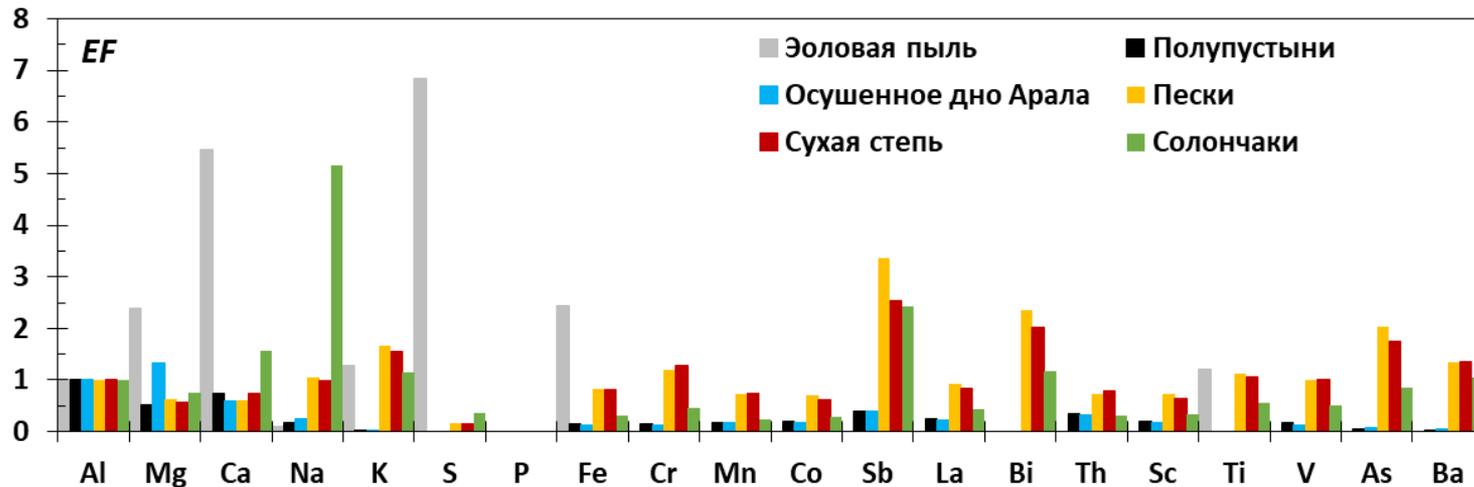
**Аридные аэрозоли Южного Приаралья и Калмыкии отличаются высоким содержанием литофильных элементов (элементов горных пород): алюминия (Al), магния (Mg), натрия (Na), калия (K), кальция (Ca), железа (Fe), фосфора (P), а также серы (S).**

**Концентрация большинства макро- и микроэлементов в аэрозолях Южного Приаралья превышает концентрацию данных элементов в аэрозолях Калмыкии (при различных ветровых условиях). Это может быть связано с совокупным влиянием таких факторов, как:**

- ✓ высокая интенсивность процессов выветривания и деградации почв в современном Приаралье;
- ✓ ландшафтно-географические и метеорологические условия;
- ✓ особенности механизмов генерации аэрозольных частиц;
- ✓ морфологические и химические свойства источников аэрозолей.



# АККУМУЛЯЦИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОЧВАХ ЛАНДШАФТОВ ЮЖНОГО ПРИАРАЛЬЯ И КАЛМЫКИИ



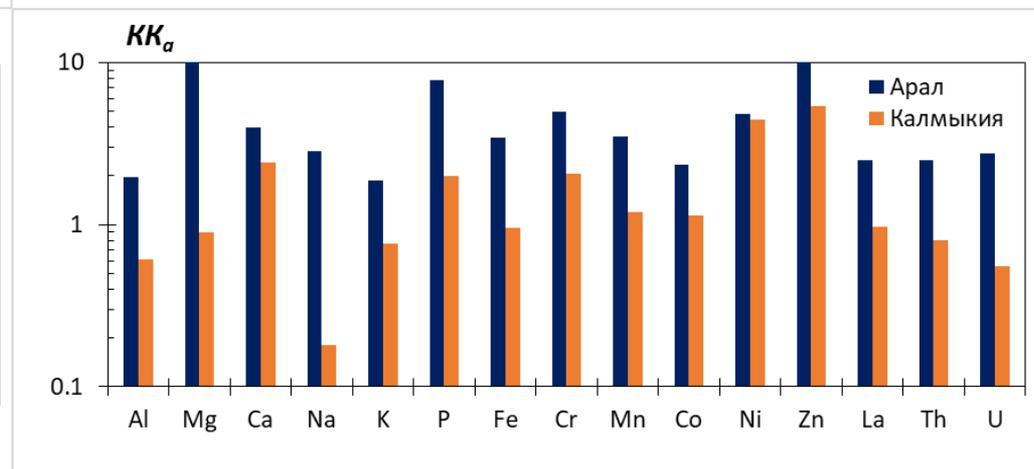
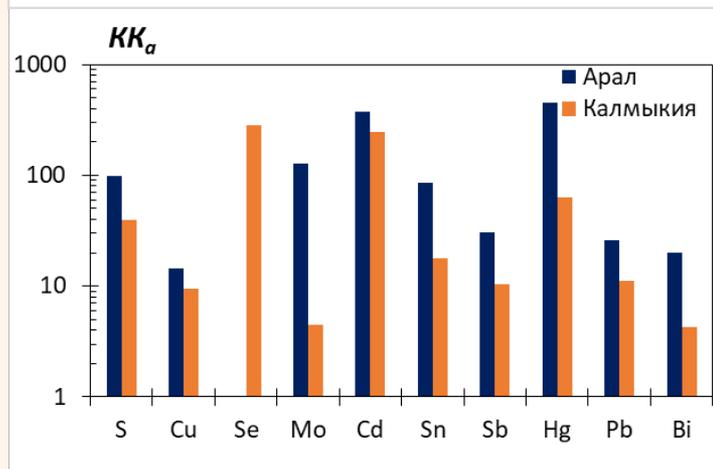
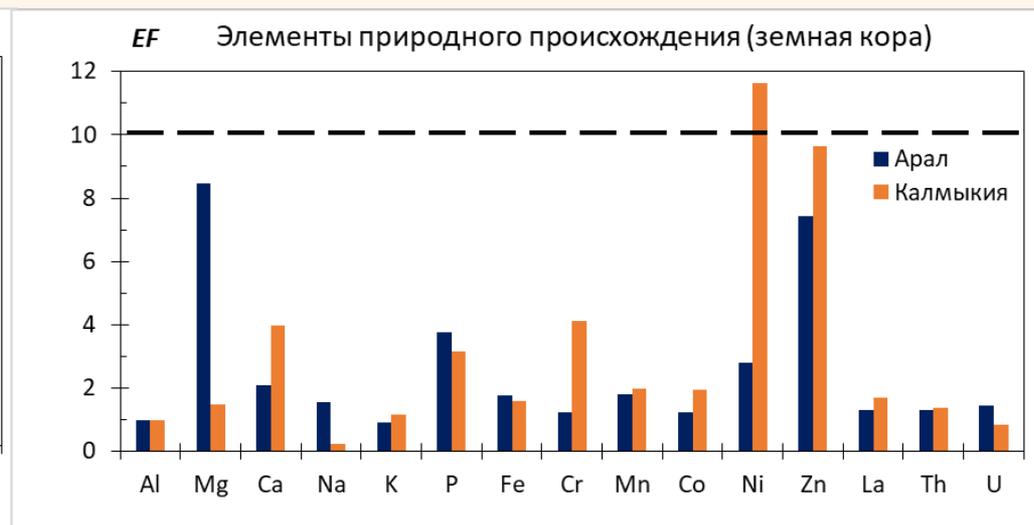
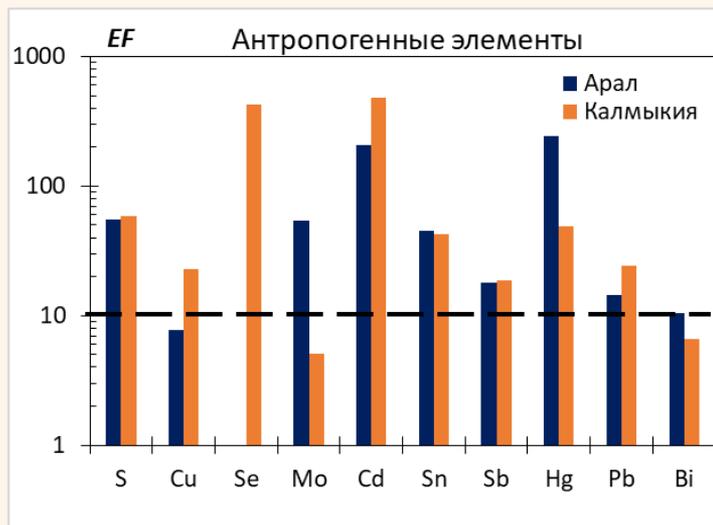
Почвы ландшафтов Южного Приаралья и Калмыкии характеризуются в целом **невысокими величинами EF и KK**. Основные отличия связаны с особенностями геохимических провинций исследуемых регионов.

Коэффициенты обогащения элементов (EF) в пробе аэрозолей или почвы (sample) по сравнению со средним составом земной коры (crust):  $EF_X = \frac{(C_X/C_{Al})_{sample}}{(C_X/C_{Al})_{crust}}$

Кларки концентрации элементов в почве (KK):  $KK = \frac{C_{Xs}}{K}$

где  $C_X$  и  $C_{Al}$  – концентрация химического элемента X и алюминия (Al) – опорного элемента почвенного происхождения;  $C_{Xs}$  – концентрация химического элемента X в почве, K – кларк элемента X в гранитном слое земной коры.

# АККУМУЛЯЦИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В АРИДНЫХ АЭРОЗОЛЯХ ЮЖНОГО ПРИАРАЛЯ И КАЛМЫКИИ



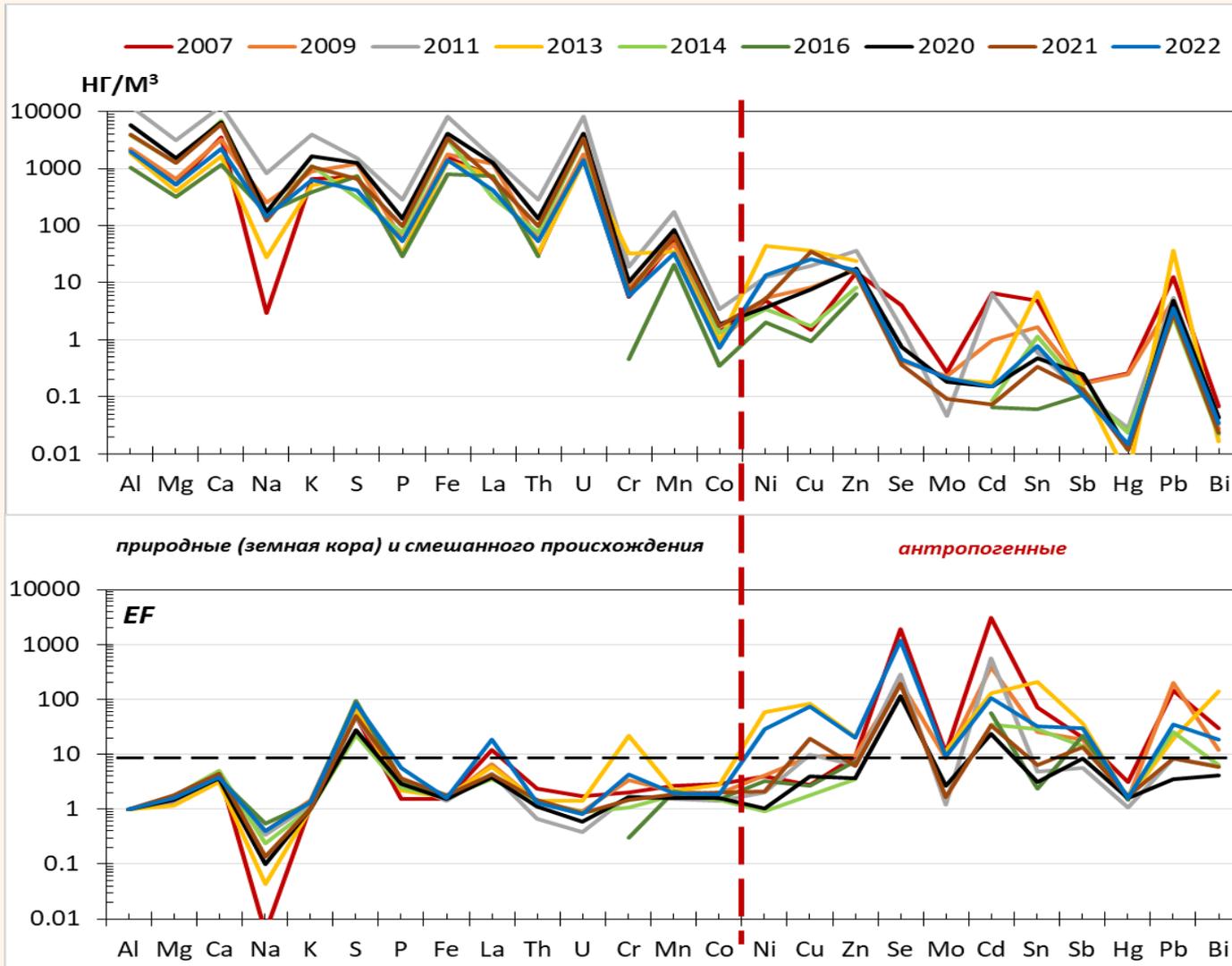
Аридные аэрозоли Южного Приаралья и Калмыкии обогащены потенциально токсичными элементами преимущественно антропогенного происхождения (в основном тяжелыми металлами и металлоидами): медью (Cu), никелем (Ni), цинком (Zn), кадмием (Cd), свинцом (Pb), оловом (Sn), сурьмой (Sb), ртутью (Hg), серой (S), селеном (Se)



# МНОГОЛЕТНИЕ НАБЛЮДЕНИЯ: ГЕОХИМИЧЕСКИЙ ПРОФИЛЬ АРИДНОГО АЭРОЗОЛЯ В КАЛМЫКИИ



Многолетняя изменчивость массовой концентрации элементов (верхний рисунок) и коэффициента обогащения элементами аридного аэрозоля в приземном воздухе Калмыкии (нижний рисунок)



Наибольшую межгодовую изменчивость претерпевает концентрация потенциально токсичных элементов антропогенного происхождения (в основном – тяжелых металлов): кадмия, никеля, меди, свинца, сурьмы, олова, молибдена. В аэрозольных частицах приземного слоя атмосферы Калмыкии сохраняется высокая интенсивность накопления серы, олова, свинца, меди, кадмия, цинка, висмута.

# МНОГОЛЕТНИЕ НАБЛЮДЕНИЯ: ИНТЕНСИВНОСТЬ АККУМУЛЯЦИИ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В АЭРОЗОЛЯХ СУХОСТЕПНЫХ ЛАНДШАФТОВ КАЛМЫКИИ



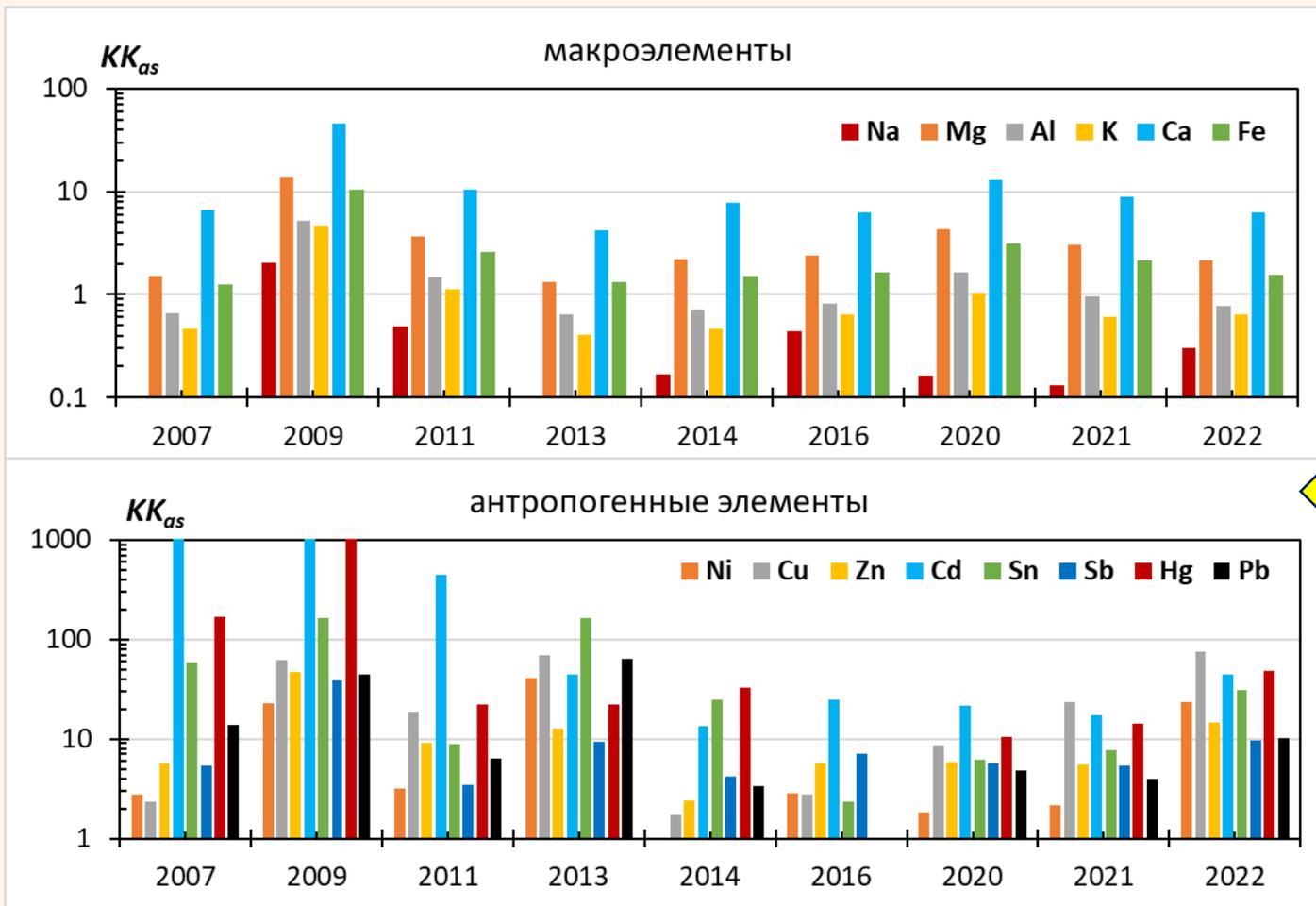
**Многолетняя изменчивость показателей коэффициентов аэрозольной концентрации (содержание химического элемента в аэрозоле/содержание химического элемента в земной коре)**

Год	0-10	10-50	50-100	Больше 100
2007	Li, Be, Na, Mg, Al, P, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Sb, Cs, Ba, La, Yb, W, Tl, Pb, Th, U	S, Sn, Hg	Bi	Se, Cd
2009	Li, Be, Na, Mg, Al, P, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Ga, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Cs, Ba, La, Yb, Ta, Tl, Th, U	B, Cu, Zn, As, Mo, Ag, Sn, Sb, Yb, Pb		S, Se, Cd, Hf, W, Re, Hg, Bi
2011	Li, Be, B, Na, Mg, Al, P, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Sn, Sb, Cs, Ba, La, Yb, Hf, W, Hg, Tl, Pb, Th, U	S, Bi		Se, Cd
2013	Li, Be, B, Na, Mg, Al, P, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Zn, Ga, As, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Sb, Cs, Ba, La, Yb, Ta, Hg, Th, U	S, Ni, Cu, Cd, Sn, Pb, Bi		Te
2014	Li, Be, B, Na, Mg, Al, P, S, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Ag, Cd, Sn, Sb, Cs, Ba, La, Yb, Hg, Tl, Pb, Th, U	S, Bi		
2016	Li, Be, B, Na, Mg, Al, P, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Sn, Sb, Cs, Ba, La, Th	S, Cd		
2020	Li, Be, Na, Mg, Al, P, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Sn, Sb, Cs, Ba, La, Yb, Hf, W, Hg, Tl, Pb, Th, U	B, S, Cd, Re, Bi	Te	Se
2021	Li, Be, Na, Mg, Al, P, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Cs, Ba, La, Yb, Hf, W, Hg, Tl, Pb, Th, U	B, S, Bi	Au	Se, Te
2022	Li, Be, B, Na, Mg, Al, P, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, Ga, As, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Sn, Sb, Cs, Ba, La, Yb, Hf, Ta, W, Hg, Tl, Pb, Th, U	S, Cu, Cd		Se, Bi

Аэрозольные частицы в приземном слое атмосферы Калмыкии **обогащены серой, оловом, тяжелыми металлами (Pb, Ni, Cu, Zn, Cd, Hg)**. **Значимая аккумуляция** данных элементов в приземных аэрозолях связана с **локальной антропогенной активностью и их переносом с прилегающих территорий**.

**Сера** стоит особняком в данном ряду. Ее постоянно **высокое содержание** в приземном слое атмосферы Калмыкии обусловлено как **выносом серосодержащих частиц с поверхности солончаков, характерных для почвенного покрова семиаридных районов, так и функционированием местных техногенных источников**.

# МНОГОЛЕТНИЕ НАБЛЮДЕНИЯ: ИНТЕНСИВНОСТЬ АККУМУЛЯЦИИ НЕКОТОРЫХ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В АЭРОЗОЛЯХ СУХОСТЕПНЫХ ЛАНДШАФТОВ КАЛМЫКИИ

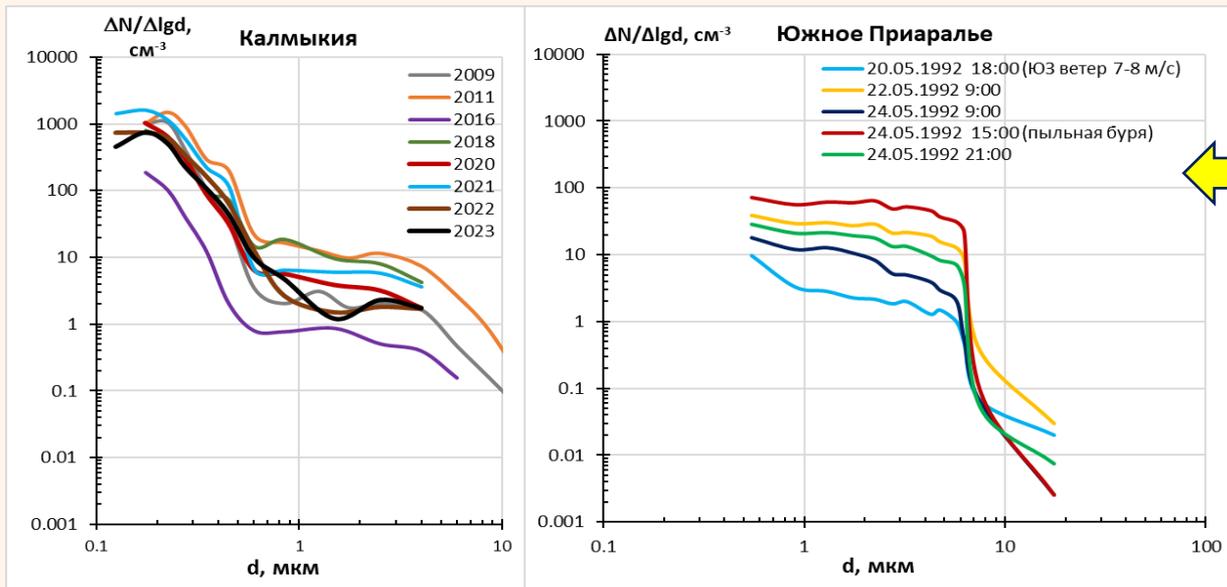


Выявлена **сильная межгодовая изменчивость интенсивности аккумуляции** как литофильных макроэлементов, так и антропогенных микроэлементов. Аридные аэрозоли Калмыкии **значительно обогащены кадмием, оловом, ртутью, свинцом**. Межгодовая изменчивость содержания потенциально токсичных элементов в аэрозолях Калмыкии обусловлена спецификой локальных источников и региональным переносом из соседних регионов.

коэффициенты локальной аэрозольной концентрации ( $KK_{as}$ ):  $KK_{as} = \frac{C_{Xa}}{C_{Xs}}$ .  
 где  $C_{Xs}$  – концентрация химического элемента X в почве,  $C_{Xa}$  – концентрация химического элемента X в твердой фазе аэрозолей.

# МИКРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АРИДНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ ЮЖНОГО ПРИАРАЛЬЯ И КАЛМЫКИИ: РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО РАЗМЕРАМ ЧАСТИЦ

## Счетное

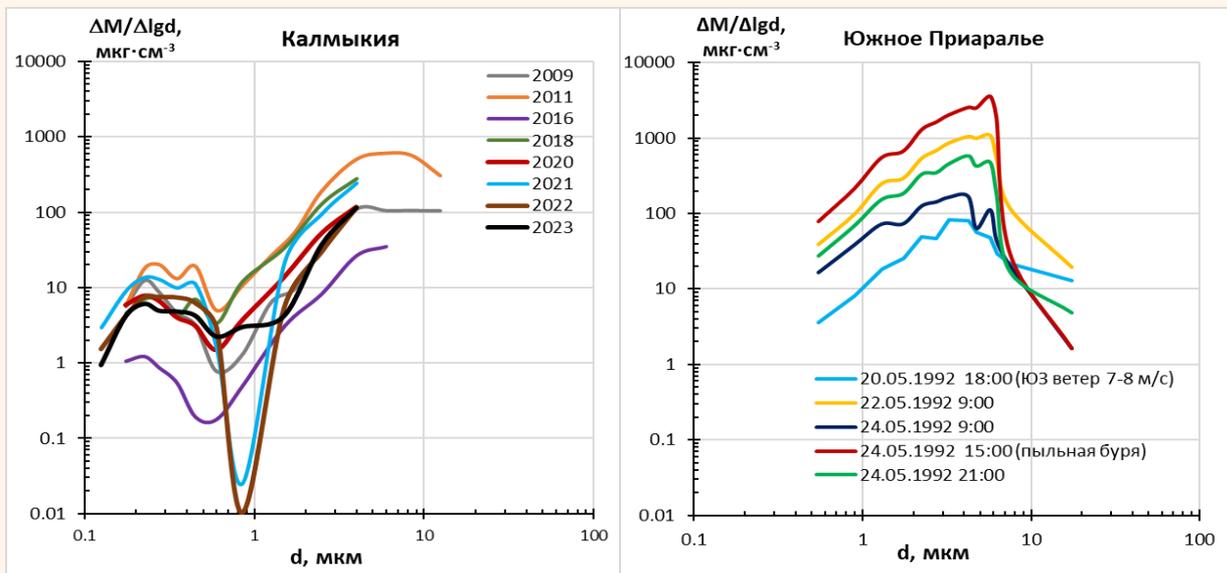


В счетном и массовом распределениях частиц по размерам в составе аридного аэрозоля в Калмыкии проявляется мода субмикронных частиц (диаметром 0.15-0.6 мкм).

В аэрозолях Южного Приаралья концентрация микронных частиц (диаметром 1-6 мкм) выше.

Различия в дисперсном составе аридных аэрозолей Калмыкии и Южного Приаралья главным образом связаны с особенностями подстилающей поверхности их ландшафтов, а также механизмами генерации, эмиссии и переноса частиц.

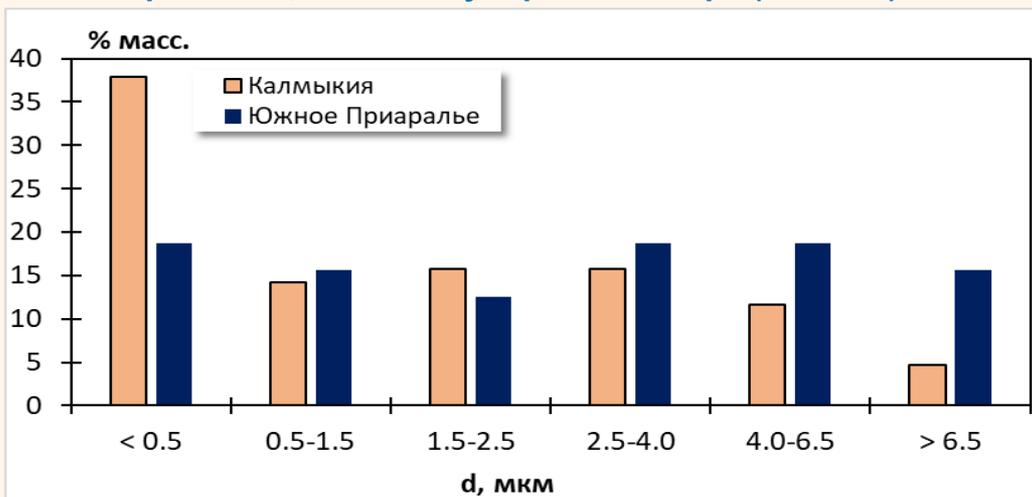
## Массовое



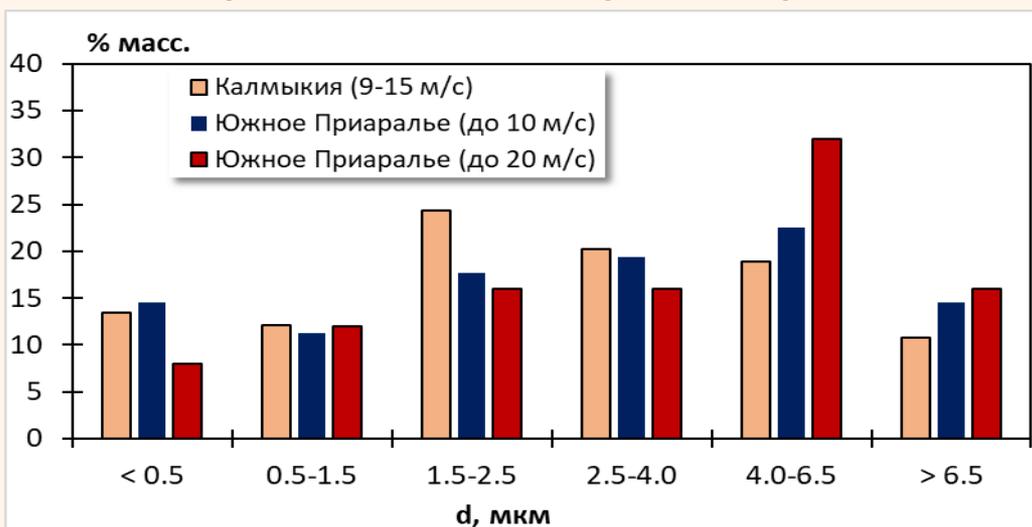
Межгодовая изменчивость дисперсного состава аридных аэрозолей в Калмыкии, в основном связанная с ветровыми условиями, мало изменяет форму функций счетного и массового распределений частиц. Эти изменения проявляются в амплитуде и небольшом смещении правой границы субмикронной моды частиц.

# МИКРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АРИДНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ ЮЖНОГО ПРИАРАЛЬЯ И КАЛМЫКИИ: МАССОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО РАЗМЕРАМ ЧАСТИЦ В РАЗНЫХ ВЕТРОВЫХ УСЛОВИЯХ (ГРАВИМЕТРИЯ)

Процентное массовое содержание фракций аэрозолей при тихом, слабом и умеренном ветре (до 6 м/с)



Процентное массовое содержание фракций аэрозолей при свежем, сильном и крепком ветре



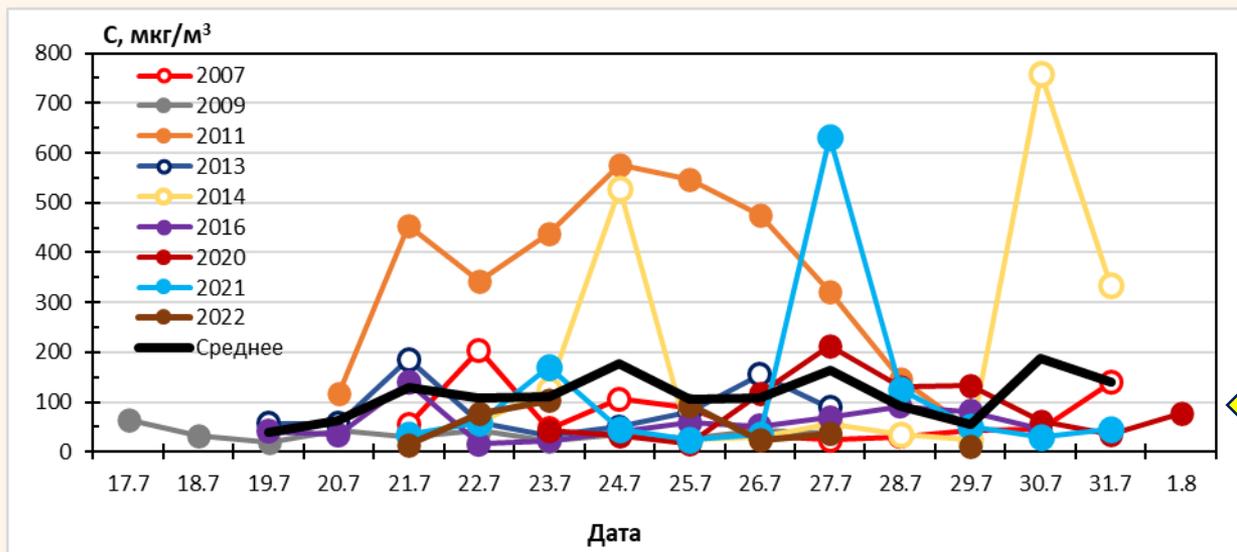
В Калмыкии при тихом и слабом ветре значительно возрастает вклад в массовую концентрацию приземного аэрозоля самых мелких субмикронных частиц ( $d < 0.5$  мкм).

В Южном Приаралье эта тенденция выражена слабо, и явного всплеска эмиссии субмикронных частиц при штиле или слабом ветре не происходит.

При свежем, сильном и крепком ветре вклад в массовое процентное распределение в большей степени вносят микронные частицы ( $1.5$  мкм  $< d < 6.5$  мкм), причем в аэрозолях Калмыкии максимальное значение массового распределения характерно для фракции частиц с диаметром  $1.5-2.5$  мкм, а в Приаралье – для фракции более крупных частиц с диаметром  $4.0-6.5$  мкм. Отличия связаны с разными морфологическими и геохимическими свойствами подстилающей поверхности, а также зависят от метеорологических условий, синоптических процессов и природы региональных антропогенных источников эмиссии аэрозольных частиц.

# МНОГОЛЕТНЯЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СРЕДНЕСУТОЧНОЙ МАССОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ АРИДНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ КАЛМЫКИИ (ГРАВИМЕТРИЯ)

Временной ход. Июль 2007-2022 гг.



Многолетняя изменчивость массовой концентрации аридных аэрозолей в Калмыкии главным образом **связана с особенностями подстилающей поверхности (опустыненные участки с подвижными песчаными массивами), синоптической обстановкой и метеорологическими условиями.** Она характеризуется **флуктуациями значений величин в пределах одного порядка (в 2-5 раз при тихом и слабом ветре; до 10 раз – при умеренном и свежем ветре).**

## Описательная статистика

год	период наблюдений	min	max	среднее	СКО	Медиана
2007	21.07.-31.07.	24.2	203.76	73.82	55.93	46.75
2009	17.07.-27.07.	20.3	64.1	36.11	12.29	35.78
2011	20.07.-29.07.	44.83	575.5	346.34	186.46	390.54
2013	19.07.-27.07.	33.33	186.06	85.06	51.59	58.67
2014	22.07.-31.07.	25.34	758.29	197.67	258.48	57.54
2016	19.07.-30.07.	16.56	138.99	57.76	33.94	49.23
2020	23.07.-01.08.	16.68	214.2	86.31	61.88	70.06
2021	21.07.-31.07.	24.33	631.28	114.08	177.42	45.96
2022	20.07.-30.07.	10.51	104.13	51.74	39.01	37.9

Губанова Д.П., Чхетиани О.Г., Кудерина Т.М. и др.  
**Экспериментальные исследования аэрозолей в атмосфере семиаридных ландшафтов Калмыкии.**  
**1. Микрофизические параметры и массовая концентрация аэрозольных частиц.**  
*Геофизические процессы и биосфера.* 2018. Т. 17. № 1. С. 5-29.  
<https://doi.org/10.21455/GPB2018.1-1>

- ✓ Арало-Каспийский регион (АКР) является интенсивным источником эмиссии пыли, оказывающей воздействие на Европейскую часть России. За период с 2011 – по 2024 гг. выявлено 9 эпизодов дальнего атмосферного переноса пыли из АКР в Московскую область (длительностью 3-11 суток), обусловившие аномальный рост массовой концентрации аэрозоля  $PM_{10}$  в приземном воздухе мегаполиса, в том числе с превышением среднесуточной ПДК ( $60 \text{ мкг/м}^3$ ).
- ✓ Обобщены данные многолетних наблюдений и исследований химический состав аэрозолей и почв типичных ландшафтов аридных зон Южного Приаралья и Калмыкии. Выявлено различие по минералогическому и химическому составу почв Южного Приаралья и Калмыкии, что обусловлено литолого-генетическими особенностями изученных ключевых участков. В частности, полупустынные почвы и поверхностный слой высохшего дна Арала отличаются богатым содержанием  $Al_2O_3$ ,  $MgO$  и  $MnO$ . Во всех типах ландшафтов (за исключением солончаков в Калмыкии) выявлено повышенное содержание железа. Хлор и натрий в достаточном количестве обнаружены в почвах полупустынь и осушенного дна Арала, а также в солончаках Калмыкии. Значимое процентное массовое содержание калия присуще всем почвам. Основное отличие по массовому процентному содержанию элементов почв Южного Приаралья от почв Калмыкии заключается в обогащении ландшафтов Южного Приаралья кальцием и магнием. Почвы ландшафтов Южного Приаралья и Калмыкии характеризуются в целом невысокими величинами  $EF$  и  $KK$ . Основные отличия связаны с особенностями геохимических провинций исследуемых регионов.
- ✓ Аридные аэрозоли Южного Приаралья и Калмыкии характеризуются высоким содержанием литофильных элементов (элементов горных пород): алюминия (Al), магния (Mg), натрия (Na), калия (K), кальция (Ca), железа (Fe), фосфора (P), а также серы (S). Концентрация большинства макро- и микроэлементов в аэрозолях Южного Приаралья превышает концентрацию данных элементов в аэрозолях Калмыкии (при различных ветровых условиях). Это может быть связано с совокупным влиянием таких факторов, как высокая интенсивность процессов выветривания и деградации почв в современном Приаралье, ландшафтно-географические и метеорологические условия, особенности механизмов генерации аэрозольных частиц, морфологические и химические свойства источников аэрозолей.
- ✓ Аридные аэрозоли Южного Приаралья и Калмыкии обогащены серой (S) и потенциально токсичными элементами преимущественно антропогенного происхождения (в основном тяжелыми металлами и металлоидами): медью (Cu), никелем (Ni), цинком (Zn), кадмием (Cd), свинцом (Pb), оловом (Sn), сурьмой (Sb), ртутью (Hg), селеном (Se). Причем исследования межгодовой изменчивости геохимического профиля аэрозолей Калмыкии показали, что высокая интенсивность накопления этих элементов в аэрозольных частицах сохраняется. Это связано с локальной антропогенной активностью и их переносом с прилегающих территорий.

- ✓ Исследовано распределение по массе и числу частиц аридных аэрозолей Южного Приаралья и Калмыкии в разных ветровых условиях. В Калмыкии при тихом и слабом ветре значительно возрастает вклад в массовую концентрацию приземного аэрозоля самых мелких субмикронных частиц ( $d < 0.5$  мкм). В Южном Приаралье эта тенденция выражена слабо. При свежем, сильном и крепком ветре вклад в массовое процентное распределение в большей степени вносят микронные частицы ( $1.5 \text{ мкм} < d < 6.5 \text{ мкм}$ ), причем в аэрозолях Калмыкии максимальное значение массового распределения характерно для фракции частиц с диаметром 1.5-2.5 мкм, а в Южном Приаралье – для фракции более крупных частиц с диаметром 4.0-6.5 мкм. Отличия связаны с разными морфологическими и геохимическими свойствами подстилающей поверхности, а также зависят от метеорологических условий, синоптических процессов и природы региональных антропогенных источников эмиссии аэрозольных частиц.
- ✓ Различия в дисперсном составе аридных аэрозолей Калмыкии и Южного Приаралья главным образом связаны с особенностями подстилающей поверхности их ландшафтов, а также механизмами генерации, эмиссии и переноса частиц. В счетном и массовом распределениях частиц по размерам в составе аридного аэрозоля Калмыкии проявляется мода субмикронных частиц (диаметром 0.15-0.6 мкм). В аэрозолях Южного Приаралья концентрация микронных частиц (диаметром 1-6 мкм) выше. Межгодовая изменчивость дисперсного состава аридных аэрозолей в Калмыкии, в основном связанная с ветровыми условиями, мало изменяет форму функций счетного и массового распределений частиц. Эти изменения проявляются в амплитуде и небольшом смещении правой границы субмикронной моды частиц.
- ✓ Многолетняя изменчивость массовой концентрации аридных аэрозолей в Калмыкии характеризуется флуктуациями значений величин в пределах одного порядка (в 2-5 раз при тихом и слабом ветре; до 10 раз – при умеренном и свежем ветре).
- ✓ В целом на динамику изменчивости дисперсного и химического состава приземного аэрозоля аридных районов Южного Приаралья и Калмыкии сильное влияние оказывают природные и антропогенные факторы (синоптическая обстановка, усиление ветровой эрозии, повышение температуры и конвективный вынос, увеличение антропогенной нагрузки на территорию и т.п.).

# Благодарности

Авторы благодарны *сотрудникам лаборатории Минералогии и микроморфологии почв Почвенного института им. В.В. Докучаева под руководством д.с.-х.н., проф. **Н.П. Чижиковой*** за аналитические исследования почв Калмыкии.

Авторы благодарны *руководителю Аналитико-сертификационного центра Института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН (г. Черноголовка Мос. обл.) к.х.н. **В.К. Карандашеву*** за организацию и проведение многолетних аналитических исследований элементного состава аридных аэрозолей и почв типичных ландшафтов Калмыкии.

Авторы выражают признательность ***В.А. Лебедеву, А.А. Хапаеву и другим коллегам из Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН*** за неоценимую помощь в подготовке и проведении многолетних экспериментальных исследований приземного аэрозоля в Калмыкии.

*В презентации использованы фотографии **В.А. Лебедева, Л.О. Максименкова, А.А. Хапаева и других участников полевых экспедиций в Калмыкии.***

*Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, грант № 20-17-00214-П.*





*Российская Академия Наук*



**Спасибо за внимание!**

**V Всероссийская конференция с международным участием  
«Турбулентность, динамика атмосферы и климата»,  
посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова**

**19–21 ноября 2024, г. Москва**