



ДАЛЬНИЙ ПЕРЕНОС АРИДНОГО АЭРОЗОЛЯ В АРКТИЧЕСКУЮ ЗОНУ РОССИИ: НАЗЕМНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ И РЕАНАЛИЗ

Д.П. Губанова, А.А. Виноградова

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва, e-mail: gubanova@ifaran.ru

Международная конференция «ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И КЛИМАТА»,
посвященная 70-летию Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
06-09 апреля 2026 года, Кисловодск



Мотивация

Арктика — уникальная биологически продуктивная и самая уязвимая к изменениям климата, природным и антропогенным воздействиям экосистема в мире.

Одно из самых мощных воздействий на окружающую среду и климат Арктики оказывает дальний и трансграничный перенос пылевого аэрозоля в Арктику.

Современное развитие методов и средств наземных наблюдений, дистанционного зондирования Земли и атмосферы, а также, численного моделирования способствует получению новых данных и достоверной информации об атмосферных процессах, включая эмиссию и перенос аэрозолей в различных пространственно-временных масштабах.

В докладе рассматривается редкое событие — дальний перенос пыли из аридной зоны Арало-Каспийского региона через Европейскую часть в Арктическую зону России, экспериментально подтвержденный с применением данных наземных наблюдений и реанализа.



Влияние пылевого аэрозоля на экосистему и климат Арктики

Ключевые аспекты влияния атмосферной пыли:

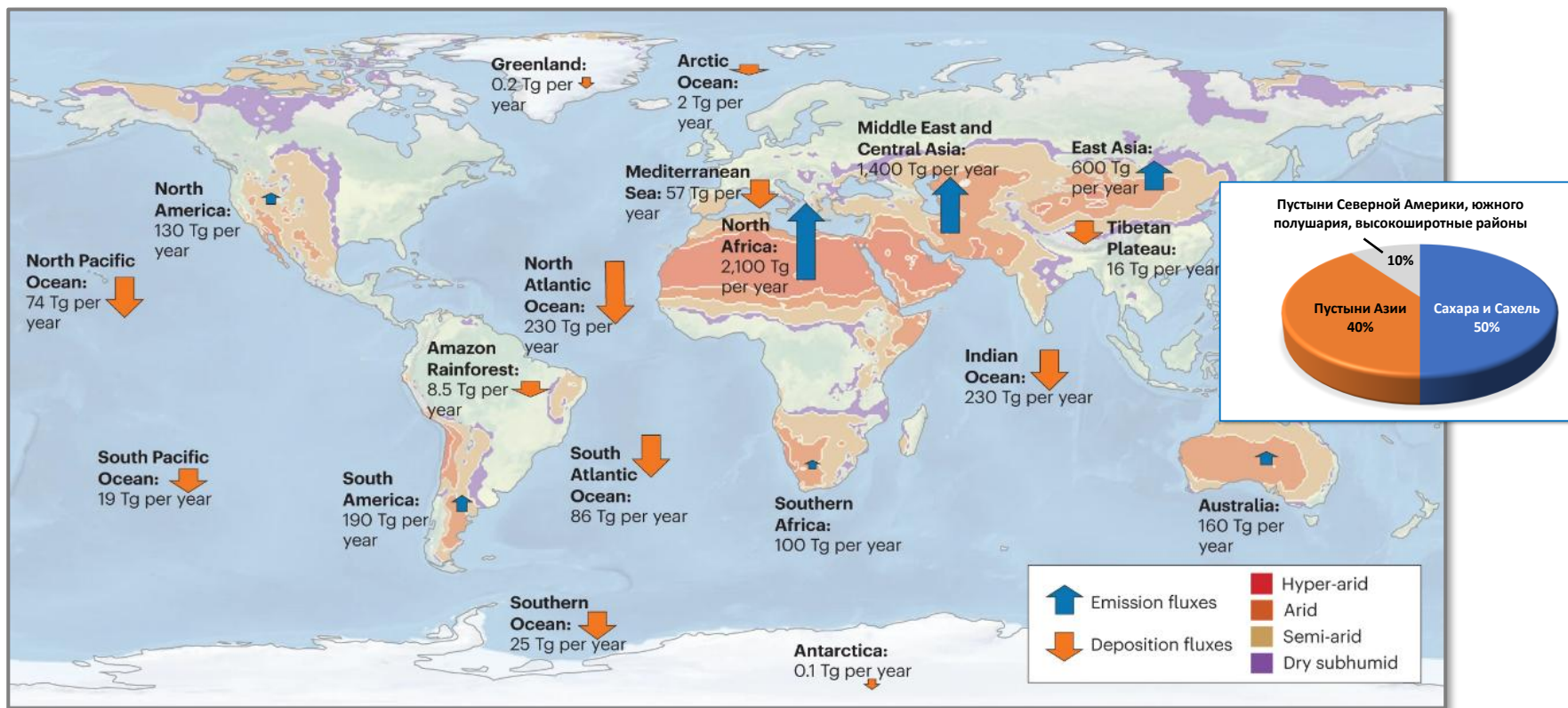
- снижение альбедо поверхности при оседании пыли на лед и снег;
- изменение радиационного баланса;
- ускорение деградации многолетней мерзлоты;
- воздействие на биогеохимию океана и суши: поступление извне в моря питательных веществ и следовых количеств металлов, необходимых для всех форм жизни (ключевой метаболический процесс, запускающий в океанах биогеохимические циклы, включая круговорот углерода, серы, фосфора и кремния); перенос вредных бактерий, вирусов, радиоактивных и токсичных веществ, тяжелых металлов и других опасных элементов и загрязнение ими почв, водоемов и атмосферного воздуха; закисление почв и вод (pH-депрессия).

Adebisi, A.A., et al. (2023) A review of coarse mineral dust in the Earth system. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2022.100849>.

Пылевой пояс Земли: регионы-источники пыли, потоки её эмиссии и осаджения

Kok, J.F., Storelvmo, T., Karydis, V.A. et al. (2023) Mineral dust aerosol impacts on global climate and climate change.

<https://doi.org/10.1038/s43017-022-00379-5>



Потоки выбросов (синие стрелки) из регионов мира, являющихся основными источниками пыли, и потоки осаджения (оранжевые стрелки) в регионах, где пыль влияет на альbedo поверхности или биогеохимию.

Основные регионы-источники пыли (выбросы из высокоширотных регионов не включены):

(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.

Дальний атмосферный перенос пыли в Арктику [1]

Böös, S. et al. (2023) *Transport of Mineral Dust Into the Arctic in Two Reanalysis Datasets of Atmospheric Composition*.

<https://doi.org/10.16993/tellusb.1866>

Groot Zwaaftink, C.D. et al. (2016) *Substantial contribution of northern high-latitude italics to mineral dust in the*

Arctic. <https://doi.org/10.1002/2016JD025482>

Stohl, A. (2006) *Characteristics of atmospheric transport into the Arctic troposphere*. <https://doi.org/10.1029/2005JD006888>

3 пути дальнего атмосферного переноса пыли в Арктику:

- (1) перенос пыли на низких высотах с последующим подъемом на большие высоты в Арктике (возможен из Европы зимой и летом, длительность – не более **4 дней**),
- (2) перенос пыли на низких высотах (возможен только из Европы и высокоширотных районов Сибири зимой, когда воздух достаточно холодный, чтобы проникать в нижнюю тропосферу Арктики, длительность **10-15 дней**),
- (3) подъем в удаленных регионах - источниках, перенос на больших высотах с последующим опусканием пыли на низкие высоты в Арктике или несколько циклов подъема и опускания пыли (преобладает при переносе из Северной Америки и Восточной Азии, возможен из Европы зимой и летом).

В Арктике ярко **выражен сезонный ход запыления**. Запыленность, в которой преобладает **пыль из удаленных источников (более 72%)**, достигает **максимума весной** из-за интенсивного транспорта пыли. Приземная концентрация **пыли от локальных высокоширотных источников (более 85%)**, как правило, **выше осенью**, хотя сезонный цикл менее выражен. Осенью, когда в тропосфере Арктики присутствует больше всего местной пыли, ее выпадение на поверхность земли максимально.

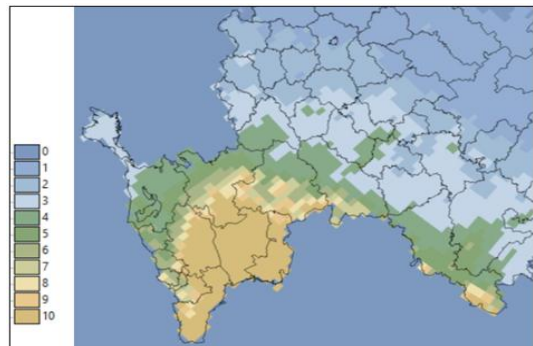
Вклад регионов-источников эмиссии пыли в содержание пылевого аэрозоля в атмосфере Арктики (по разным оценкам)



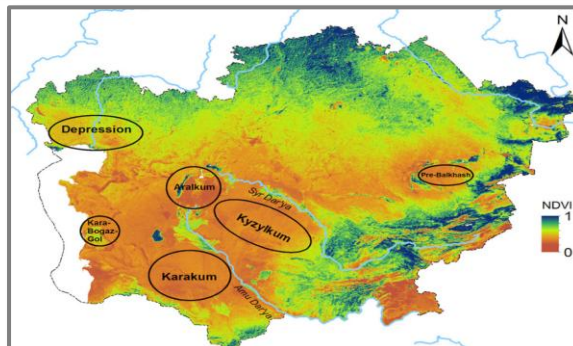
Арало-Каспийский регион как источник дальнего переноса минеральной пыли в Арктику

Основные мощные источники минеральной пыли, оказывающие влияние на регионы умеренных и высоких широт в Европейской части России (включая Западный сектор Российской Арктики) – **аридные и семиаридные районы юга ЕЧР (Республика Калмыкия, Астраханская, Волгоградская и Ростовская обл., Ставропольский край), Прикаспия и Приаралья (пустыни Аралкум, Кызылкум, Прикаспийская низменность, Кара-Богаз-Гол).**

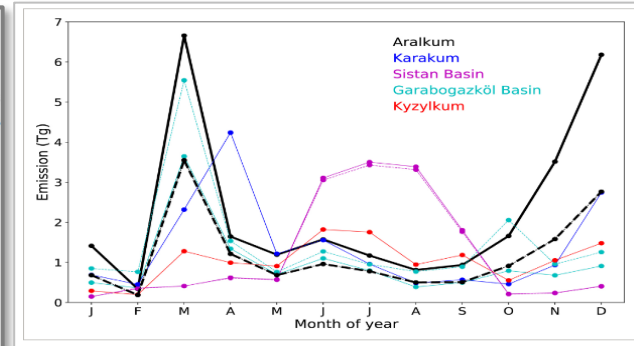
Частота пылевых явлений в Арало-Каспийском регионе (АКР) достигала 56 дней в году в 1984-2018 гг. и постепенно увеличивается в настоящее время. **Общий объем выбросов пыли в АКР в прошлом – 180.3 Тг, в настоящем – 187.3 Тг.**



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



Ежемесячная эмиссия пыли в 5-ти регионах Средней Азии: молодая пустыня Аралкум, старая пустыня Каракумы, бассейн Систана (восток Ирана, запад Афганистана), Кара-Богаз-Гол, старая пустыня Кызылкум. Пунктир – выбросы в прошлом, сплошные линии – наст. вр.



Романовская А.Ю., Савин И.Ю. (2021). DOI: 10.19047/0136-1694-2021-109-36-95.

Глушко А.Я., Разумов В.В., Рейхани М.Д. (2010). <https://ecodag.elpub.ru/ugro/article/viewFile/605/596>.

Xiao-Xiao Zhang et al. (2020). <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117734>.

Banks, J. R., Heinold, B., & Schepanski, K. (2022). <https://doi.org/10.1029/2022JD036618>

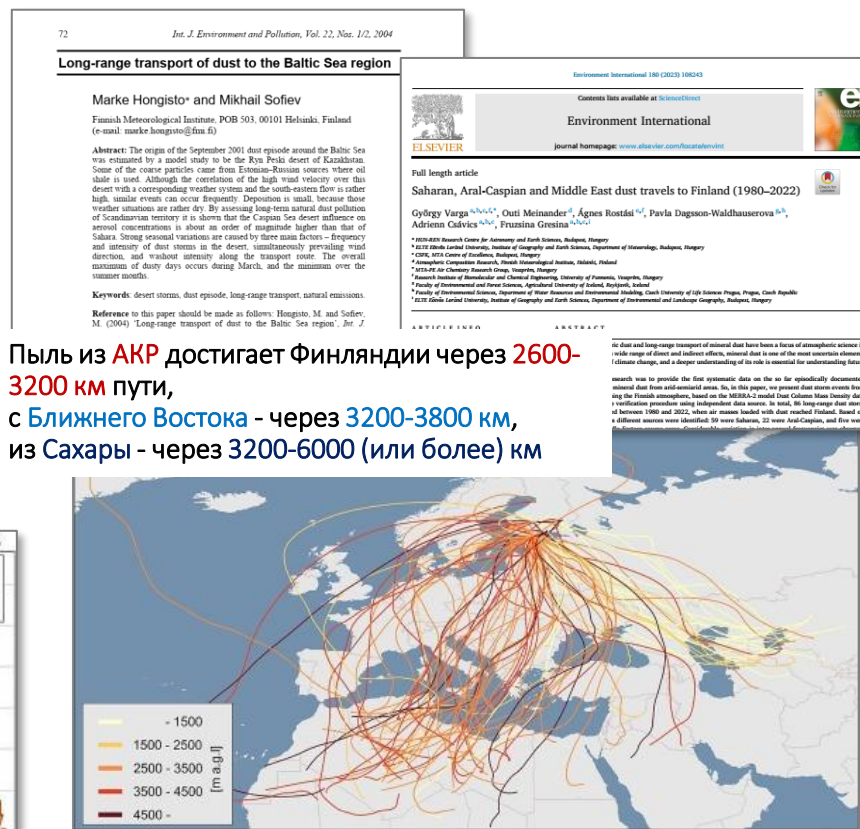
Минеральная пыль из АКР в высокоширотных районах Балтики: численное моделирование и реанализ

Hongisto, M. and Sofiev, M. (2004). Long-range transport of dust to the Baltic Sea region. https://doi.org/10.1007/978-3-540-24588-9_34
Varga, G., Meinander, O., Rostási, A., end al. (2023) Saharan, Aral-Caspian and Middle East dust travels to Finland (1980–2022). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108243>.

Анализ массива данных экспериментальных наблюдений, реанализа, численного моделирования и спутниковой информации за период 1980 г. - октябрь 2022 г.: выявлено 86 случаев возникновения пылевых бурь на большом расстоянии, затронувших Финляндию: 59 – в Сахаре, 22 – в АКР, 5 – на Ближнем Востоке.

Сезонное распределение пылевых явлений: явный максимум весной (60%), за которыми следуют лето (15%) и осень (13%). С 2010 года количество и доля редких зимних пылевых эпизодов более чем удвоились.

Дальний перенос пыли из АКР наблюдался в среднем на высоте 1750 м преимущественно весной (86%) и летом.



Пыль из АКР достигает Финляндии через 2600-3200 км пути, с Ближнего Востока - через 3200-3800 км, из Сахары - через 3200-6000 (или более) км



Обратные траектории дальних пылевых явлений, выявленных в Финляндии в период с 1980 по 2022 год (цветовая шкала показывает высоту начальной точки обратной траектории над уровнем земли).

➡ перенос пыли из АКР

Перенос воздушных масс из АКР в центральные и северные районы ЕЧР

Shukurov, K.A.; Simonenkov, D.V.; Nevzorov, A.V.; et al. (2023) 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. <https://doi.org/10.3390/rs15112819>

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

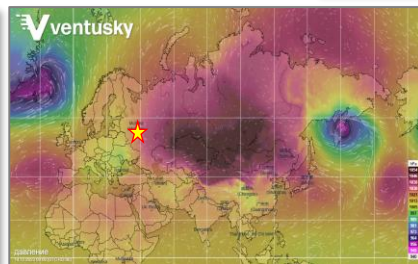
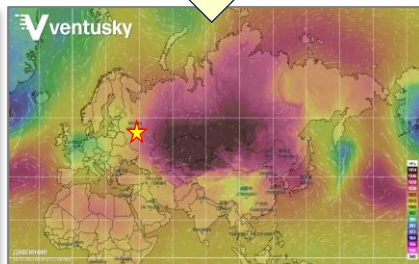
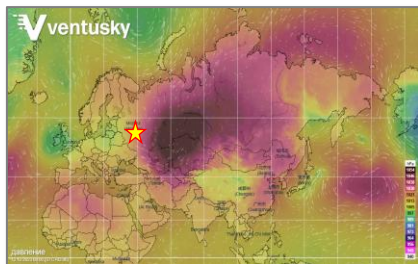
В центр и на север Европейской России перенос пыли воздушными массами из опустыненных и засушливых зон юга ЕЧР и АКР происходит по юго-западной периферии положительной аномалии геопотенциальных высот с центром над южным Уралом и Северным Казахстаном.

Результаты численных оценок для Московского региона:

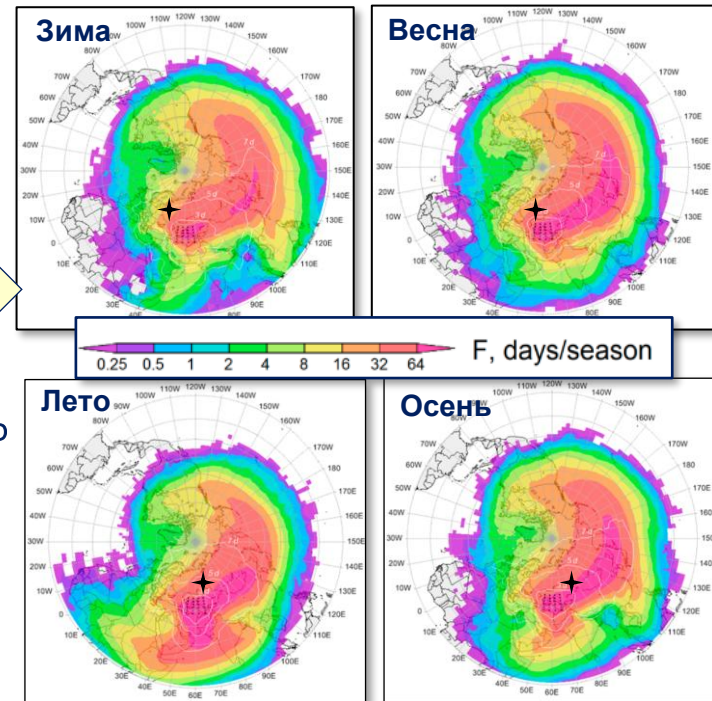
- ✓ вероятность переноса – менее 5 %,
- ✓ квазипериодические вариации – 4-6 лет.

Распределение величины атмосферного давления на уровне моря 12.12.-14.12.2023 г. ICON, разрешение 13 км. ★ - г. Москва.

<https://www.ventusky.com/ru>



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: $2^\circ \times 2^\circ$

★ расположение г. Москвы

Дальний перенос аридного аэрозоля
из АКР в Западный сектор Российской Арктики.
Экспериментальные наблюдения: история вопроса

Шевченко В.П., Коробов В.Б., Лисицын А.П. и др. (2010). Первые данные о составе пыли, окрасившей снег на европейском севере России в желтый цвет (март 2008 г.)

Губанова Д.П., Виноградова А.А., Котова Е.И. (2024) Дальний атмосферный перенос пыли из Прикаспия в Арктическую зону Европейской части России в декабре 2023 года. <https://doi.org/10.31857/S2686739724120171>.



Почти отсутствуют экспериментальные сведения о дальнем переносе пыли из АКР в высокоширотные районы Европейской части России, включая Западный сектор Российской Арктики!

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ. 2024, том 519, № 2, с. 133–140

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

UDK 551.510.42:504.3.054

ДАЛЬНИЙ АТМОСФЕРНЫЙ ПЕРЕНОС ПЫЛИ
ИЗ ПРИКАСПИЯ В АРКТИЧЕСКУЮ ЗОНУ ЕВРОПЕЙСКОЙ
ЧАСТИ РОССИИ В ДЕКАБРЕ 2023 ГОДА

© 2024 г. Д. П. Губанова^{1,*}, А. А. Виноградова^{1,2}, Е. И. Котова²

Представлено академиком РАН Г.С. Голицыным 16.05.2024 г.

Поступило 27.05.2024 г.

После доработки 31.07.2024 г.
Принято к публикации 01.08.2024 г.

Реальное явление – дальний атмосферный перенос пыли из аридных и семиаридных районов Прикаспия через центр Европейской части России в ее арктические регионы – зарегистрирован в декабре 2023 года в ходе натурных наблюдений за физико-химическими характеристиками аэрозольных частиц в Москве и за составом снежного покрова в Архангельской области. Анализ траекторий движения воздушных масс, динамики пространственно-временной изменчивости массовой концентрации аэрозолей $\text{PM}_{2.5}$ и PM_{10} в Московском регионе, а также численные оценки и пространственные распределения приземной концентрации и оптических характеристик аэрозоля в Европейской части России (по данным реанализа MERRA-2) подтверждают повышение аэрозольного загрязнения воздуха на территориях от Прикаспия до Архангельской области. В пробе снега, отобранной в Государственном природном заповеднике «Пинежский» (Архангельская область, 65°30' с.ш., 40°00' в.д.) в декабре 2023 года, обнаружены частицы размером до 20 мкм (типичный диаметр пылевой частицы 65 мкм) и характерный желтый цвет, напоминающий желтую окраску. Предварительные исследования пробы этого снега показали присутствие большого количества органической взвеси и остатков растений, что зимой указывает на атмосферный перенос аэрозоля из южных регионов России.

Ключевые слова: дальний перенос, атмосфера, пыль, аэрозольные частицы PM_{2.5} и PM₁₀, концентрация, проба снега, траекторный анализ, Прикаспий, Москва, Архангельская область
DOI: 10.31857/S2686739724120171



Общество, 27 мар 2008, 11:32

На северо-западе России выпал желтый снег

Жители северо-запада России стали свидетелями необычного природного явления. Как сообщает радиостанция "Эхо Москвы", в Архангельской области на территории трех районов выпал желтый снег.

Осадки непривычного цвета выпали на территории Виноградовского, Пинежского и Холмогорского районов. Сейчас экологи выясняют природу желтого снега, в частности произведен замер радиационного фона. По предварительным данным, он соответствует норме.

Предположительно, желтая окраска снега имеет природный характер. Она вызвана высоким содержанием песка, который попал в облака в результате пыльных бурь и смерча, произошедших в других местах планеты.

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК, 2010, том 431, № 5, с. 675–679

= ГЕОХИМИЯ

УДК 551.35

**ПЕРВЫЕ ДАННЫЕ О СОСТАВЕ ПЫЛИ,
ОКРАСИВШЕЙ СНЕГ НА ЕВРОПЕЙСКОМ СЕВЕРЕ РОССИИ
В ЖЕЛТЫЙ ЦВЕТ (МАРТ 2008 г.)**

© 2010 г. В. П. Шевченко, В. Б. Коробов, академик А. П. Лисицын, А. С. Алешинская,
О. Ю. Богданова, Н. В. Горюнова, И. В. Грищенко, О. М. Дара, Н. Н. Завернина,
Е. И. Куртеева, Е. А. Новичкова, О. С. Покровский, Ф. В. Сапожников

Поступило 02.12.2009 г.

Выпадение очень большого количества пыли, окрашивающей атмосферные осадки в фоновых районах умеренной, субполярной и полярной зон северного полушария в яркие цвета, наблюдается сейчас [1–5]. На севере Европейской части России XX и начале XXI века такие события официально не регистрировались. Впервые они были отмечены 6 марта 2008 г., когда в ряде районов Архангельской области, Республики Коми и Ненецкого автономного округа (рис. 1) наблюдались выпадение атмосферных осадков в виде мокрого снега и дождя, образованных на снежном покрове ледяную корку, имеющую цвет от песочного до желтого. В ряде населенных пунктов в этот период в проб подразделением Росгидромета антропогенного загрязнения снега выявлено не было [7].

Для получения информации о составе этой атмосферной пыли нами детально исследованы пробы снега из 5 пунктов (табл. 1). После растапливания пробы желтого снега были упарены. Минеральный состав определен методом рентгенофазового анализа на дифрактометре Дрон-2.0. Препараты с желтой пылью были просматриваны под сканирующим электронным

жение на УФ-свет, энергодисперсионный спектр и электроннограмм. Элементарный состав проб из окрестностей поселков Емецк и Зачатье определен после полного кислотного разложения ультрачистыми HF и HNO₃ в чистой комнате класса A10000 методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на приборах Elan 6000 ("Perkin Elmer") и Agilent-7500 по методике, описанной в ряде работ [8]. Правильность результатов контролировалась по результатам анализов международного стандарта озерных донных осадков LKSD-1.

Содержание алюминия в желтой пыли варьирует от 3,88% (Емек) до 6,49% (Зачаче), что ниже его среднего содержания в верхней части континентальной земной коры (8,15%) [9]. Эти данные свидетельствуют о минеральной природе желтой пыли с примесью органического вещества. Просмотр пыли под сканирующим электронным микроскопом показал преобладание во всех пробах минеральных частиц пелитовой и мелколеситовой фракций. Отмечены также и биогенные частицы (волокна, споры, пыльца, створки диатомовых водорослей).

<https://www.rbc.ru/society/27/03/2008/5703cbcc9a79470eaf769e10>

Дальний перенос аридного аэрозоля из АКР в Западный сектор Российской Арктики. Экспериментальные наблюдения в Московском регионе

Городская сеть АСКЗА ГПБУ «Мосэкомониторинг»

АВТОМАТИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ КОНТРОЛЯ
ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

- ВБЛИЗИ АВТОМАГИСТРАЛЕЙ
- СМЕШАННЫЕ ТЕРРИТОРИИ
- ЖИЛЫЕ ТЕРРИТОРИИ
- ПРИРОДНЫЕ ТЕРРИТОРИИ
- СТАНЦИИ В ТИНАО
- МНОГОУРОВНЕВНЫЙ ПУНКТ МОНИТОРИНГА
- МОБИЛЬНЫЕ СТАНЦИИ

Аэрозольный комплекс ЗНС ИФА РАН

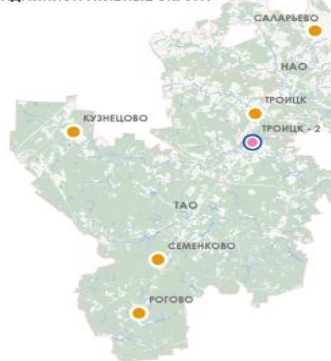


ЗВЕНИГОРОД

ЗНС ИФА РАН

Губанова Д.П., Виноградова А.А.,
Лезина Е.А. и др. (2023).
DOI:10.31857/S0002351523060056.

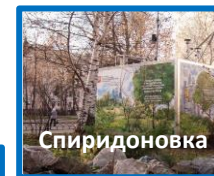
ТРОИЦКИЙ И НОВОМОСКОВСКИЙ
АДМИНИСТРАТИВНЫЕ ОКРУГА



Аэрозольный комплекс ИФА РАН



ИФА РАН

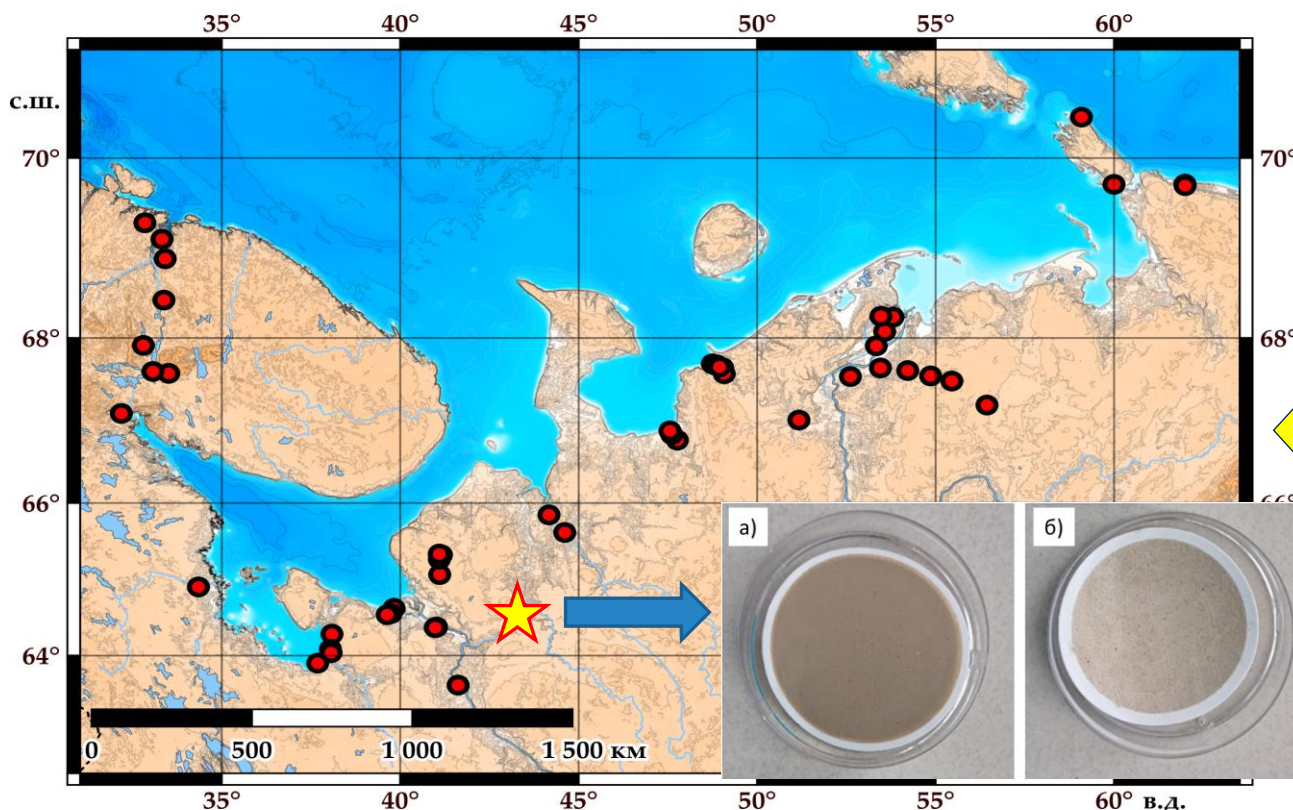


<https://mosecom.mos.ru/>

Доклад «О состоянии окружающей среды в городе Москве в 2022 году» / Под ред. А. О. Кульбачевского. – Москва, 2023. – 276 с.

Дальний перенос аридного аэрозоля АКР в Западный сектор Российской Арктики. Полевые исследования геохимических характеристик снежного покрова в Арктической зоне

Исследования геохимических характеристик снежного покрова в Северо-Западном отделении
Института океанологии им. П.П. Ширшова (зимний сезон 2023-2024 гг.)



Приборы для лабораторного
исследования проб:

- сканирующий электронный микроскоп Vega 3 SEM (TESCAN) с микроанализатором (микрозондом) INCA Energy (Oxford Instruments Analytical);
- биологический стереоскопический микроскоп МБС-10.

Карта-схема точек забора проб
снежного покрова на территории
Кольского п-ва, Архангельской обл. и
Ненецкого Автономного округа в ходе
полевой кампании 2023-2024 гг.

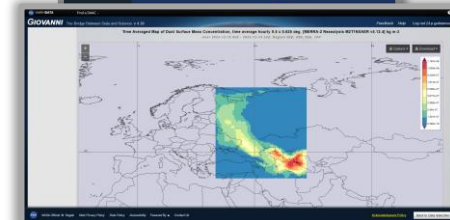
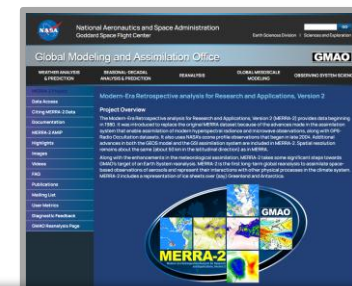
Общий вид фильтров, отобранных в
Государственном природном
заповеднике "Пинежский"
(Архангельской обл.):
(а) – после фильтрации прослойки
желтого снега (250 мл);
(б) – после фильтрации усредненной
пробы снежной толщи (1250 мл).

Дальний перенос аридного аэрозоля АКР в Западный сектор Российской Арктики. Данные реанализа и траекторный анализ

Система реанализа MERRA-2 (The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, ver. 2)
/NASA GMAO (Global Modelling and Assimilation Office/

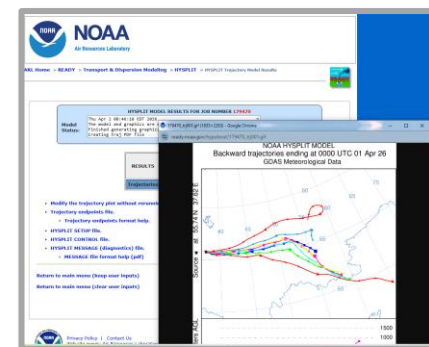
В основе MERRA-2 – модель GEOS-5 (Goddard Earth Observing System, версия 5):

- блоки моделирования циркуляции атмосферы и океана, состава атмосферы, биогеохимии, процессов на поверхности Земли и др.;
- период современной космической эры (с 1980-х гг.),
- 72 атмосферных σ -уровня вплоть до 0,01 гПа (~ 85 км);
- пространственное разрешение $0,5^\circ \times 0,625^\circ$ (широта $\times$ долгота);
- система ассимиляции данных, обеспечивающая совместное усвоение результатов наблюдений метеорологических полей и аэрозольной оптической толщины (АОТ), полученной на основе результатов спутниковых измерений спектрорадиометрами MODIS, AVHRR, MISR, а также наземных измерений прямого излучения фотометрами CE 318 сети AERONET.



Дисперсионная модель NOAA HYSPLIT 4 (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) /www.arl.noaa.gov/

Модель HYSPLIT объединяет два классических подхода: лагранжев (траекторный) и эйлеров (континуальный) и позволяет осуществить трехмерное моделирование процесса формирования и распространения облака воздушных загрязнений от заданного источника.



Gelaro R., et al. (2017). The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2 (MERRA-2). doi:10.1175/JCLI-D-16-0758.1.
Stein A.F., et al. (2015). HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>

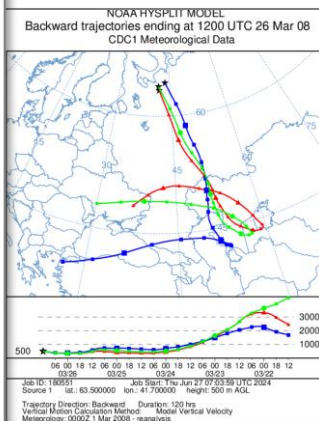
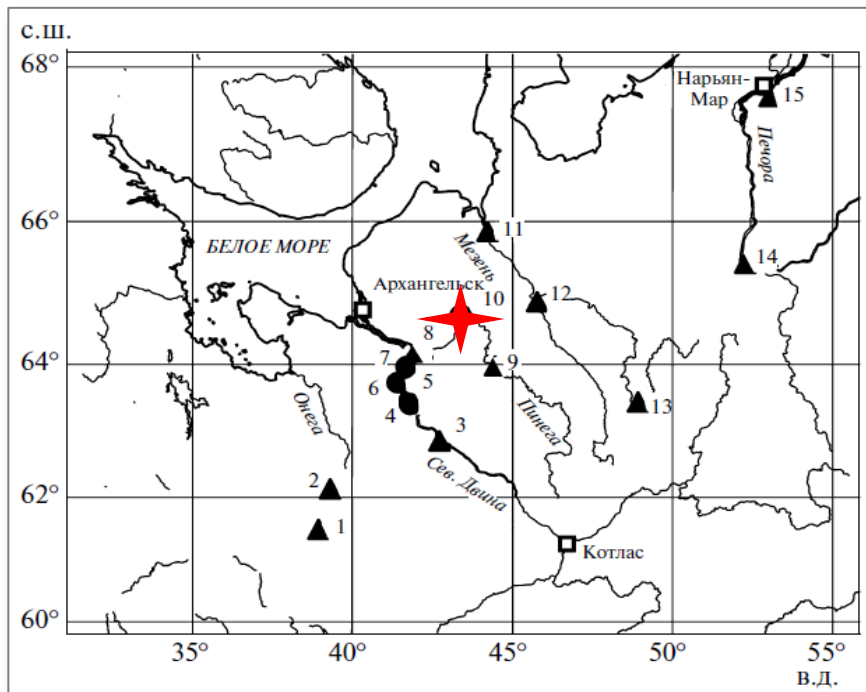
Дальний перенос аридного аэрозоля АКР в Западный сектор Российской Арктики. Выявленные события

№ п.п.	Дата эпизода	Сезон	Длительность, сут.	Хронология и данные
1	22.03.- 27.03.2008.	весна	5	Первый экспериментально зарегистрированный эпизод: геохимия снежного покрова, траекторный анализ, реанализ MERRA-2, данные АСКЗА МЭМ
2	30.03.- 02.04.2015.	весна	4	Третий экспериментально зарегистрированный эпизод: данные АСКЗА МЭМ, траекторный анализ, реанализ MERRA-2
3	14.12.- 16.12.2023.	зима	3	Второй экспериментально зарегистрированный эпизод: данные ИФА РАН и АСКЗА МЭМ, траекторный анализ, реанализ MERRA-2, геохимия снежного покрова

Дальний перенос аридного аэрозоля из АКР в западный сектор Российской Арктики: развитие эпизода 1 [1]

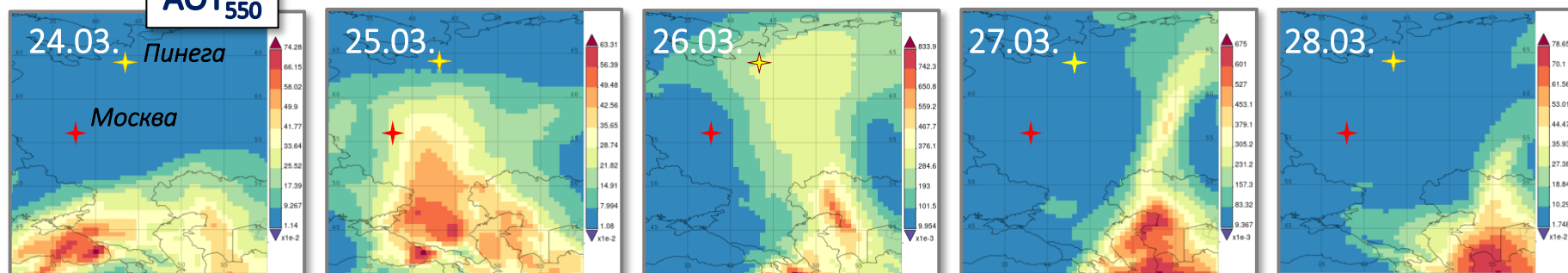
Шевченко В.П., Коробов В.Б., Лисицын А.П. и др. (2010). Первые данные о составе пыли, окрасившей снег на европейском севере России в желтый цвет (март 2008 г.).

Первый экспериментально зарегистрированный эпизод [24.03. - 28.03.2008.] на севере ЕЧР

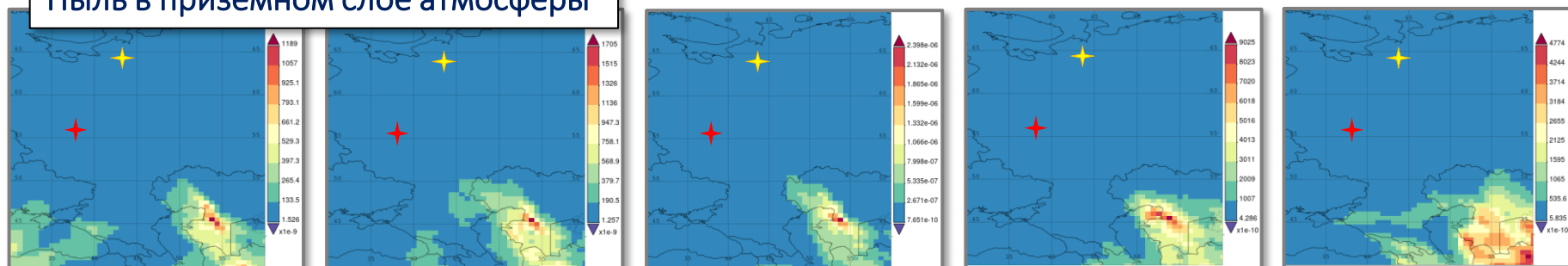


Дальний перенос аридного аэрозоля из АКР в западный сектор Российской Арктики: развитие эпизода 1 [2]

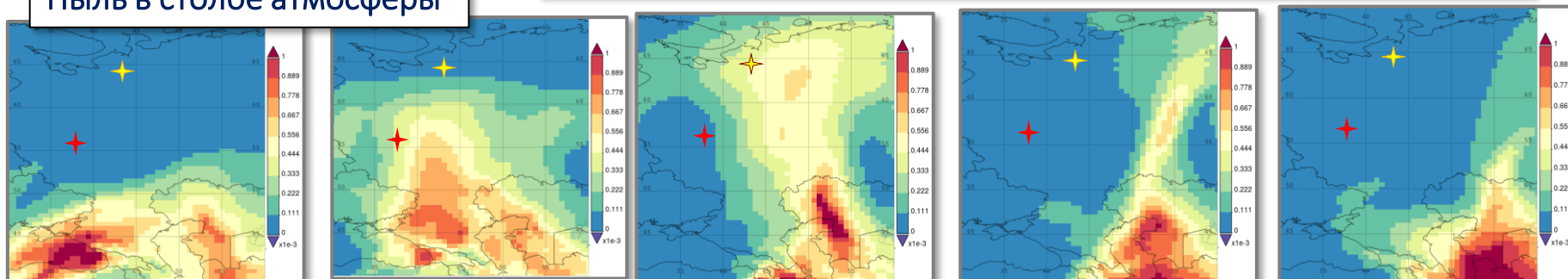
AOT₅₅₀



Пыль в приземном слое атмосферы



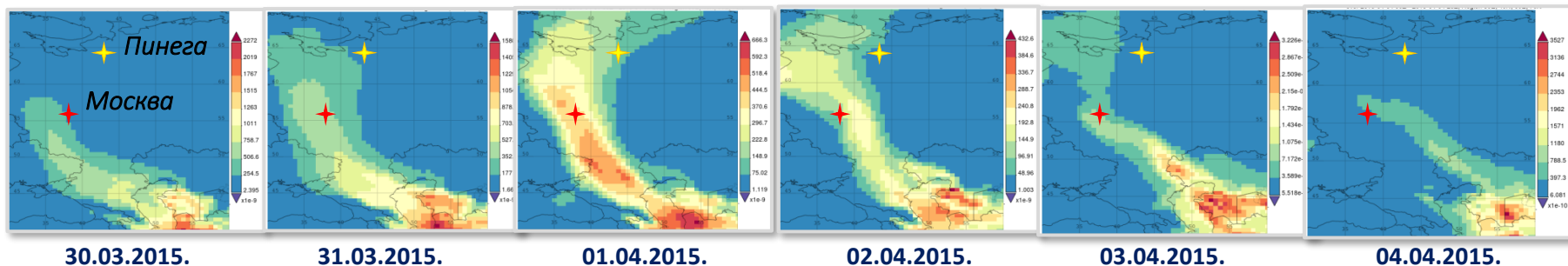
Пыль в столбе атмосферы



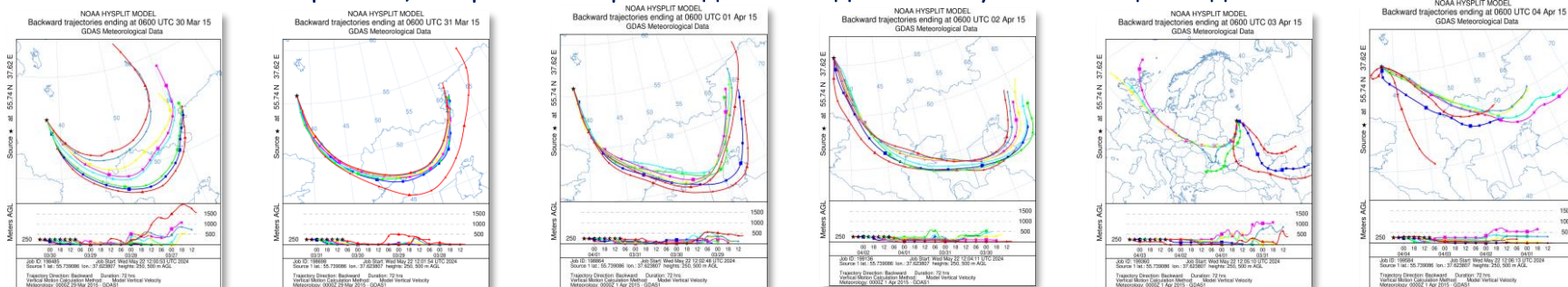
ОТЛИЧИЕ: Распространение пыли в верхних слоях атмосферы

Дальний перенос аридного аэрозоля из АКР в западный сектор Российской Арктики: развитие эпизода 2

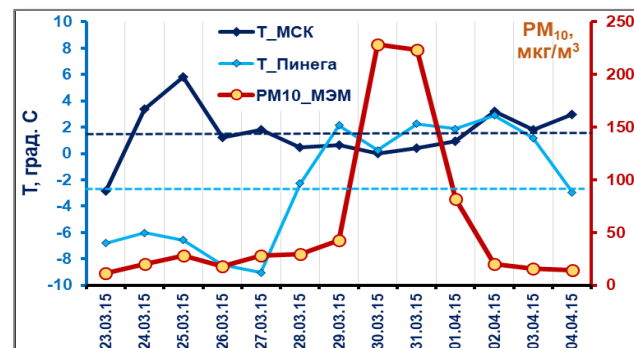
Пространственное распределение приземной массовой концентрации пыли по данным реанализа MERRA-2



Обратные 3-суточные траектории движения воздушных масс к Москве на высотах 250 и 500 м от подстилающей поверхности, построенные через каждые 3 часа для тех же суток с помощью модели HYSPLIT 4

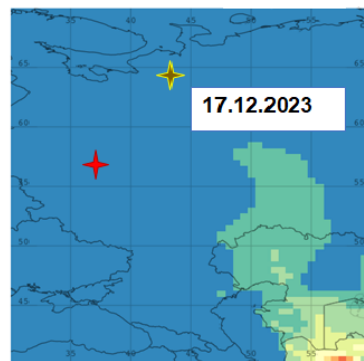
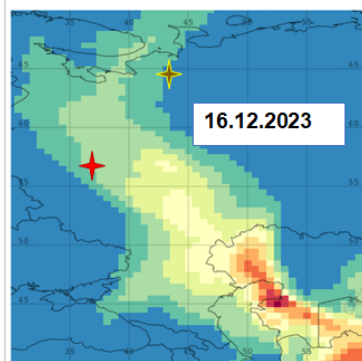
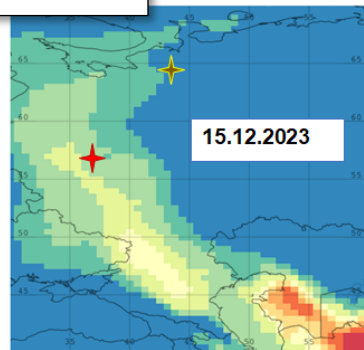
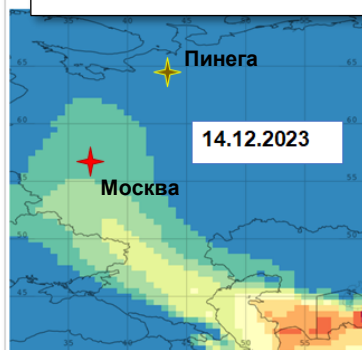
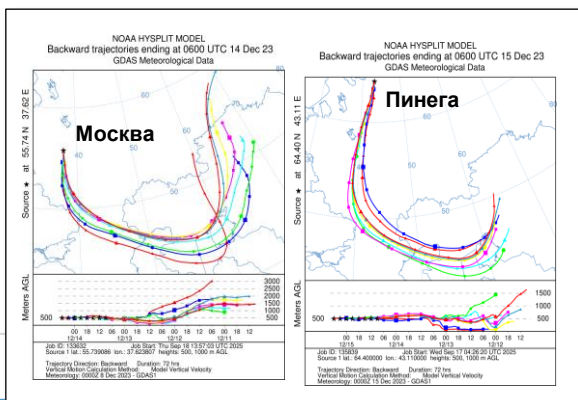


Среднесуточная приземная массовая концентрация аэрозольных частиц PM_{10} по данным наблюдений на сети АСКЗА ГПУ «Мосэкомониторинг» и температура воздуха T в Москве и в Пинеге. Приведены значения концентрации PM_{10} , усредненные по всем АСКЗА.

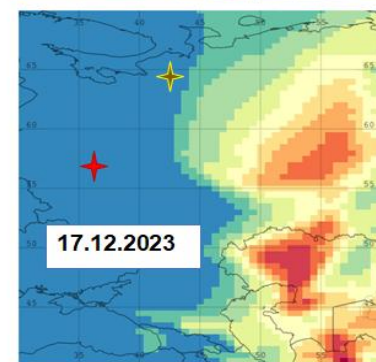
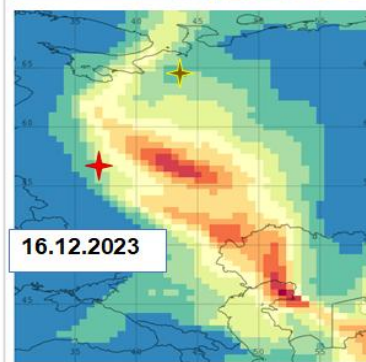
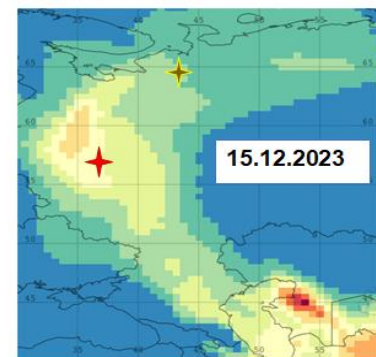
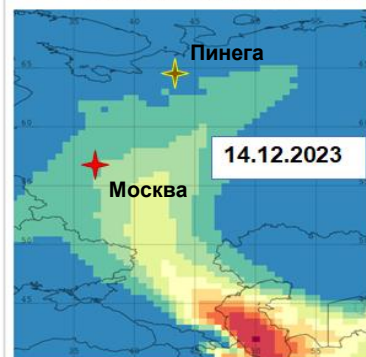


Дальний перенос аридного аэрозоля из АКР в западный сектор Российской Арктики: развитие эпизода 3 [1]

Среднее за сутки пространственное распределение над ЕЧР по данным реанализа MERRA-2 **приземной концентрации пыли (слева)** и **AOT₅₅₀ (справа)**

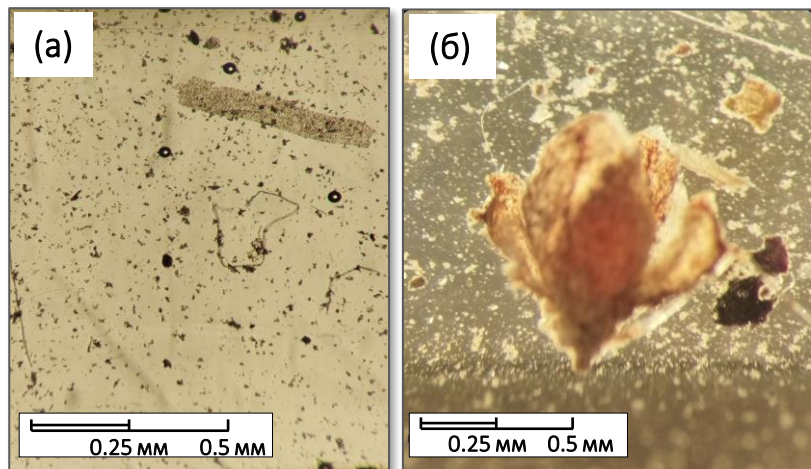


Time Averaged Map of Dust Extinction AOT 550 nm, time average hourly 0.5 x 0.625 deg.
[MERRA-2 Reanalysis M2T1NXAER v5.12.4]. Region 30E, 40N, 60E, 70N



Дальний перенос аридного аэрозоля из АКР в западный сектор Российской Арктики: развитие эпизода 3 [2]

Результаты исследования геохимических характеристик снежного покрова на территории Кольского полуострова, Архангельской обл. и Ненецкого Автономного округа, полученные в ИО РАН



Растительные остатки в пробе снега, отобранной вблизи пос. Пинега Архангельской обл.: (а) – мелкий детрит, растительные волокна; (б) – остатки высшего растения.

Электронно-микроскопическое исследование после фильтрации прослойки талого желтого снега: фильтр плотно завален минеральными окатанными зернами (а).

Выявлено большое количество минералов Ca, Al, Si и два редких минерала – предположительно апатит (Ca, P, REE) и циркон.

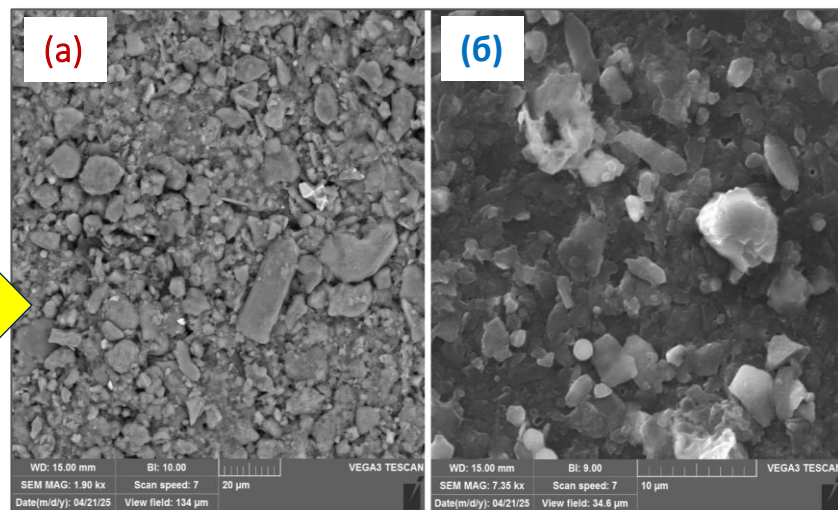
В образце много кварца и минералов титана, по внешнему виду минеральных зерен мало отличающихся от образца усредненной пробы (б), где на фильтре обнаружены преимущественно минеральные частицы широкого спектра размеров (до 20 мкм). Среди минералов выделяются кварц, полевые шпаты и другие алюмосиликаты, а также минералы титана и железа, фрагменты растений и редкие сферы сгорания.

В толще снежного покрова пробы, отобранной в марте 2024 года на территории заповедника «Пинежский», обнаружен слой выпавшего в декабре 2023 г. снега, имеющий охряную окраску.

В общей толще снега содержание взвеси невелико: 3.6–3.8 мг/л и близко к среднему значению для западного сектора Российской Арктики. В окрашенном снеге содержание взвеси высокое – 199 мг/л.

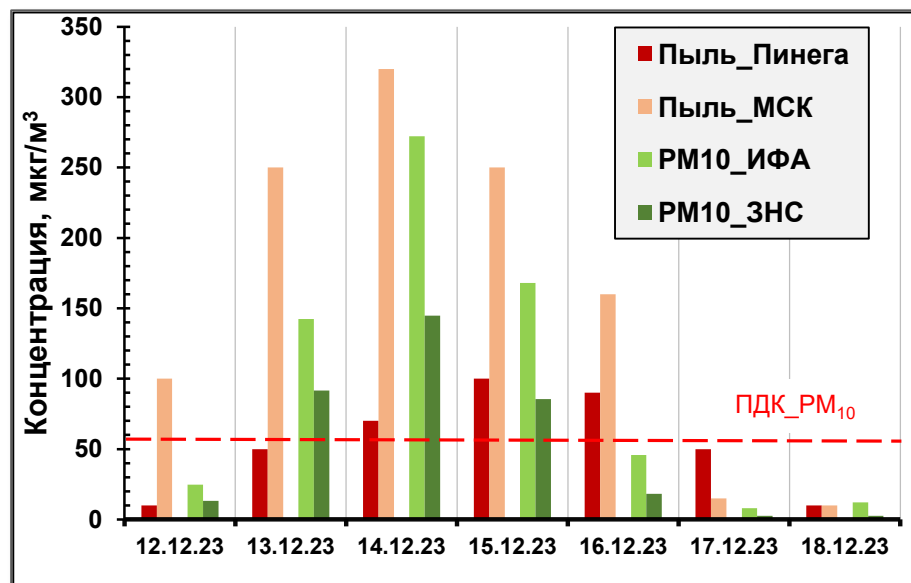
Окрашенный снег сильно обогащен растворимыми формами кремния по сравнению с усредненными пробами (48.1 и 5.1 мкг Si/л, соответственно).

Выявлена значительная концентрация фосфора (56.7 мкгP/л) за счет более высокого содержания фосфатов. Концентрация органического фосфора в прослойке окрашенного снега – выше в 2.5 раза, содержание общих и органических форм азота – выше в 2 раза.



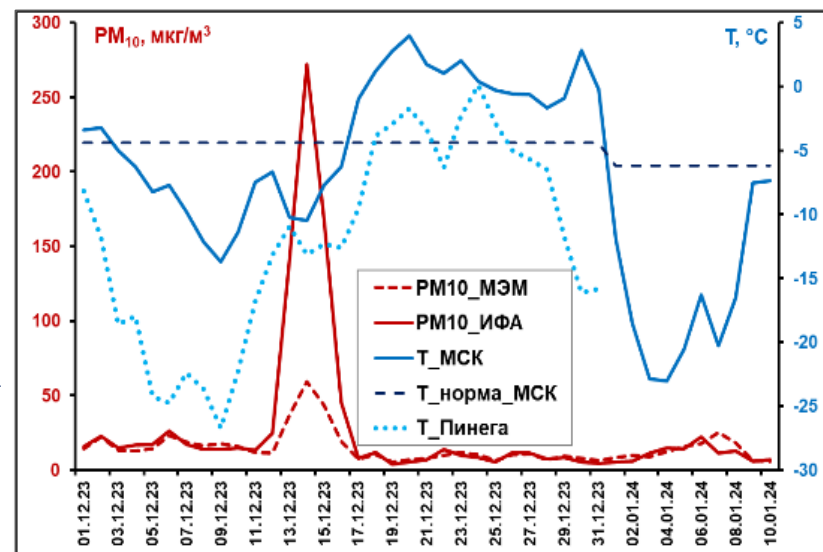
Дальний перенос аридного аэрозоля из АКР в западный сектор Российской Арктики: развитие эпизода 3 [3]

Губанова Д.П., Виноградова А.А., Котова Е.И. (2024) Дальний атмосферный перенос пыли из Прикаспия в Арктическую зону Европейской части России в декабре 2023 года. <https://doi.org/10.31857/S2686739724120171>.

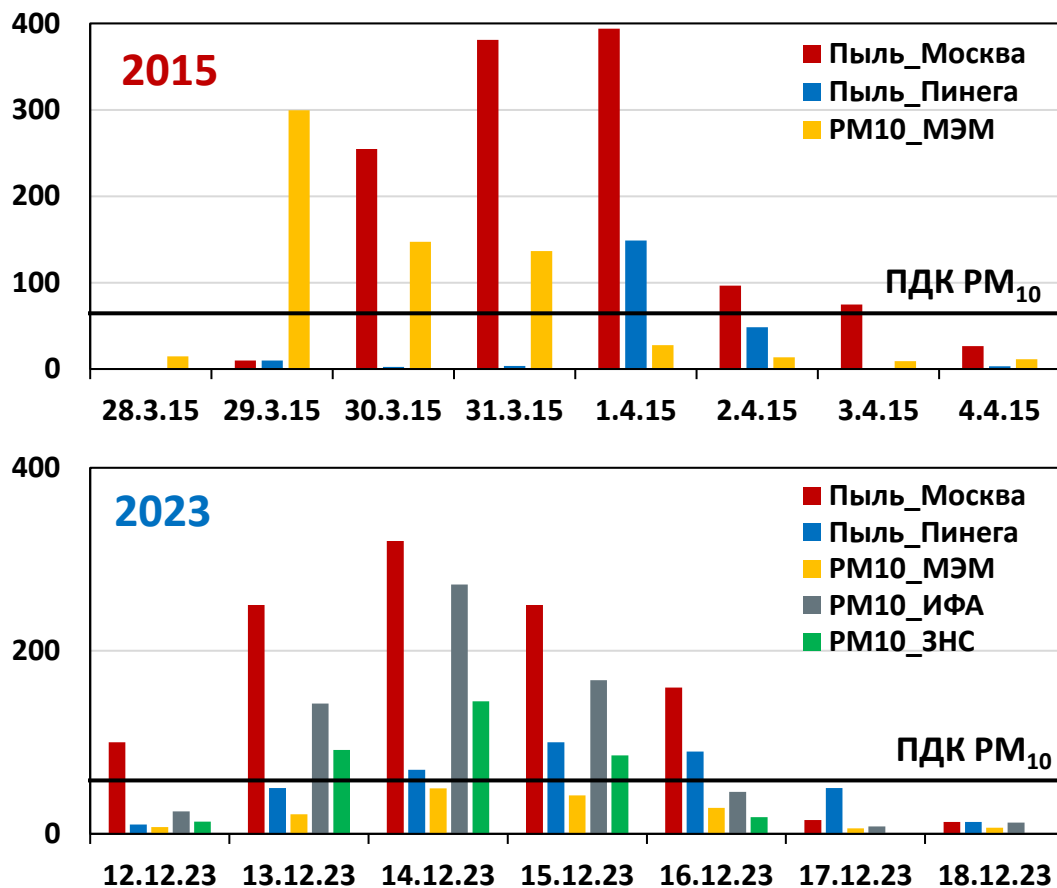


Среднесуточная **приземная концентрация пыли** [по оценкам MERRA-2] – в Пинеге (Архангельская обл.) и в Московском регионе (МСК); **аэрозолей PM₁₀** – в Москве (ИФА РАН) и в пригороде (ЗНС) [по данным экспериментальных наблюдений ИФА РАН]

PM₁₀ в Москве (станции МЭМ и ИФА).
Температура воздуха в Москве и в Пинеге.
Температурный отклик запоздал на несколько суток и длился дольше. **Зима**



Дальний перенос аридного аэрозоля из АКР в западный сектор Российской Арктики: отклик приземной концентрации пыли в сравнении эпизодов 2 и 3

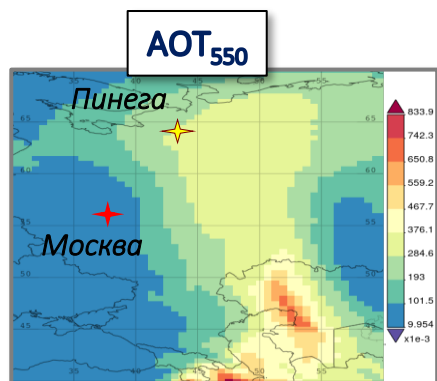


Сравнение эффекта аномально высокого роста среднесуточной приземной концентрации пыли (мкг/м^3) в Пинеге (Архангельская обл.) и в Московском регионе [по оценкам реанализа MERRA-2] и аэрозолей PM_{10} (мкг/м^3) – в Москве и в пригороде (ЗНС ИФА РАН) [по данным экспериментальных наблюдений ИФА РАН и ГПБУ «Мосэкомониторинг»]

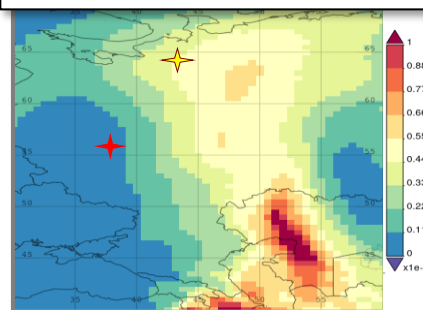
Дальний перенос аридного аэрозоля АКР в Западный сектор Российской Арктики. Сравнение трех выявленных эпизодов

Эпизод 1. 26.03.2008

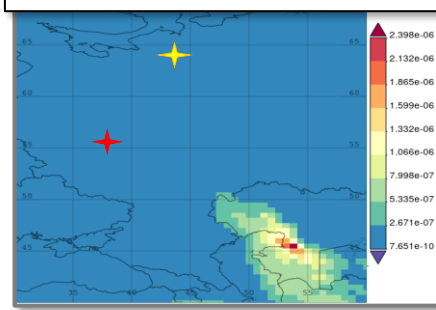
Перенос в верхних
слоях атмосферы.
Т – эффект внизу
мал.



Пыль в столбе атмосферы

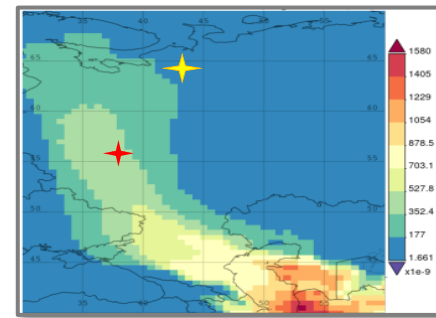
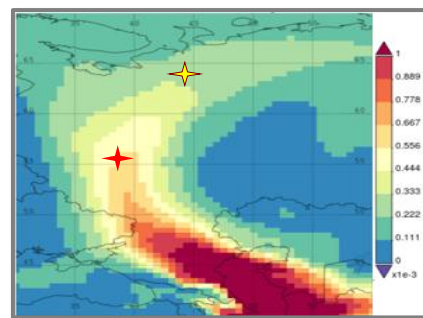
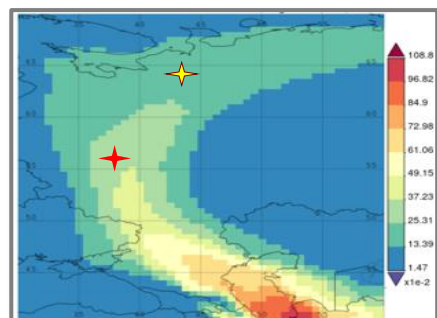


Пыль в приземном слое



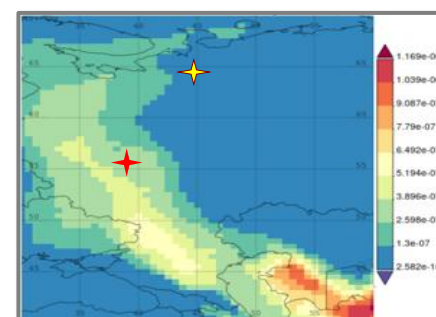
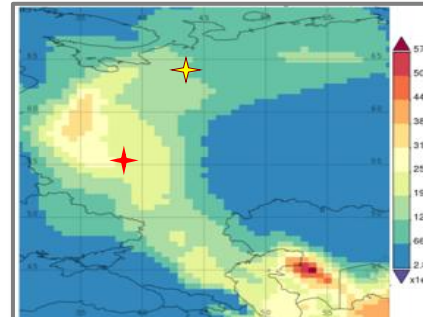
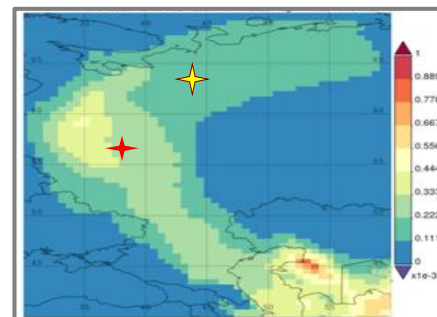
Эпизод 2. 31.03.2015.

Максимальные
эффекты в Т и в
PM₁₀. Не было
осадков на севере



Эпизод 3. 15.12.2023.

Регистрация в
весеннем шурфе
снега



Дальний перенос аридного аэрозоля АКР в Западный сектор Российской Арктики. Описание выявленных событий

Некоторые статистические показатели характеристик аэрозолей и метеопараметров, зарегистрированные во время эпизодов дальнего переноса пыли из АКР в Арктику

№ п.п.	Дата эпизода	Длительность, сут.	Температура воздуха, °C, $\Delta T = T_{\text{max}} - T_{\text{ср.вне эпи,}}$ (МСК/Пинега)	Осадки, мм/мес, $\Delta P = P_{\text{max}} - P_{\text{ср.вне эпи многолетн,}}$ (МСК)	Температура воздуха, °C, $\Delta T = T_{\text{max}} - T_{\text{ср.вне эпи многолетн,}}$ (МСК)
1	22.03.-27.03.2008.	5	2.5/нет данных	-17,9	1,9
2	30.03.-02.04.2015.	4	1.0/5.0	-24,9	2,1
3	14.12.-16.12.2023.	3	8.0/10.0	28,6	-0,6

Описательная статистика среднемесячных показателей массовой концентрации аэрозолей PM_{10} в Москве (по данным ИФА РАН и МЭМ) во время эпизодов дальнего переноса пыли из АКР в Арктику

№ п.п.	Дата эпизода	Массовая концентрация PM_{10} , мкг/м ³ . ПДКс.с.=60 мкг/м ³			
		Среднее	Max	Среднее_ЭПИ	ЭПИ/вне ЭПИ
1	22.03.-27.03.2008.	25	51	35	1.6
2	30.03.-02.04.2015.	52	228	178	4.3
3	14.12.-16.12.2023.	16	59	47	3.8

ВЫВОДЫ [1]

- ❑ Проанализированы данные реанализа MERRA-2, траекторного анализа (HYSPLIT), наземных экспериментальных наблюдений характеристик аэрозолей в Москве с 2006 года по настоящее время. Выявлены и достоверно подтверждены результатами экспериментальных наблюдений в ИФА РАН и ИО РАН 3 эпизода дальнего переноса пыли из Арало-каспийского региона (АКР) в Западный сектор Российской Арктики (ЗСА).
- ❑ Установлено, что такие «пылевые явления» происходят с периодичностью в 7-8 лет (2008, 2015, 2023 гг.) в разные сезоны года (2 – весной, 1 – зимой). Их длительность составляет 3-5 суток.
- ❑ Перенос пыли из АКР в центр и на север ЕЧР, включая ЗСА, осуществляется по юго-западной периферии положительной аномалии геопотенциальных высот с центром над Южным Уралом и Северным Казахстаном.
- ❑ Установлено, что перенос аридной пыли из АКР в ЗСА возможен как на низких высотах (сотни м над поверхностью земли), так и на больших высотах (тысячи м). По первому варианту, который представляется более предпочтительным, дальний перенос пыли происходил весной 2015 г. и зимой 2023 г. Расстояние по пути перемещения пылевых масс из АКР в ЗСА составляет более 2200 км.
- ❑ При дальнем переносе пыли из АКР в ЗСА на низких высотах наблюдается аномальный рост приземной концентрации аэрозолей PM_{10} с превышением среднесуточной ПДК в Московском регионе (экспериментально зарегистрировано ИФА РАН и ГПБУ «Мосэкомониторинг») и в других регионах ЕЧР (подтверждено данными реанализа) по пути переноса пылевых масс в высокоширотные области.

ВЫВОДЫ [2]

- ❑ Геохимические характеристики отобранных в Архангельской области и Ненецком Автономном округе в 2008 и 2023 гг. проб снежного покрова, включая данные о минеральном составе снега, подтвердили происхождение осевшей на снег пыли из аридных зон АКР. Установлено хорошее согласие между результатами геохимических исследований в 2008 и 2023 гг.
- ❑ Дальний перенос пыли из АКР в ЗСА сопровождается «волнами тепла», формирующимися в результате переноса более теплого воздуха из южных аридных регионов. Во время «пылевых явлений» экспериментально регистрируется рост температуры воздуха, который приводит к повышению среднемесячной температуры воздуха в месяцы, когда наблюдаются пылевые эпизоды.
- ❑ Из-за малого количества выявленных случаев эпизодов дальнего переноса пыли из АКР в ЗСА статистически достоверные закономерности изменчивости характеристик дальнего переноса пыли (периодичность, сезонность и длительность «пылевых явлений»; высота переноса пылевых масс над уровнем поверхности земли; количественные показатели сопровождающих «пылевые явления» температурного эффекта и эффекта аномального роста массовой концентрации пылевого аэрозоля) не выявлены.

Благодарности

Авторы выражают признательность сотрудникам ИФА РАН:

ведущему инженеру ЛГПА А.П. Медведеву, ведущему инженеру ЛГГ В.А. Лебедеву и ведущему инженеру ЛОМА Ю.В. Жуланову за техническое и аппаратно-программное сопровождение при подготовке приборов и оборудования к экспериментальным наблюдениям и в ходе наблюдений физико-химических характеристик приземного аэрозоля в Московском регионе.

Авторы благодарны руководству ГПБУ «Мосэкомониторинг» за предоставленную возможность доступа к базе данных, полученных на городской сети АСКЗА.

Большое спасибо директору Северо-Западного отделения ИО РАН Котовой Е.И. и старшему научному сотруднику ИО РАН Стародымовой Д.П. за предоставленные данные исследований геохимических характеристик снежного покрова в Государственном природном заповеднике «Пинежский» (Архангельская обл.).

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИФА РАН № 125020501413-6





Спасибо за внимание!