

ПЫЛЕВЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ЮЖНОМ ПРИАРАЛЬЕ: СПЕЦИФИКА И ТИПИЧНОСТЬ

Тлеумуратова Б.С. Каракалпакское отделение Академии наук Республики Узбекистан, Нукус, Узбекистан; доктор физико-математических наук, профессор, заведующая Лабораторией моделирования экологических процессов Каракалпакского научно-исследовательского института естественных наук

Нарымбетов Б.Ж. Каракалпакское отделение Академии наук Республики Узбекистан, Нукус, Узбекистан; доктор (PhD) технических наук, старший научный сотрудник Лаборатории моделирования экологических процессов Каракалпакского научно-исследовательского института естественных наук

Султашов Р.Г. Каракалпакское отделение Академии наук Республики Узбекистан, Нукус, Узбекистан; докторант Лаборатории моделирования экологических процессов Каракалпакского научно-исследовательского института естественных наук

Шаудирбаев Н.Т. Каракалпакский государственный университет имени Бердаха, Узбекистан, Нукус, магистрант 1-курс Геодезия и геоинформатика

Аннотация: В статье рассматриваются пылевые явления (пыле-песчаные бури, соле-песчаные бури, конвективный вынос) в Южном Приаралье с точки зрения их типичности (схожести с аналогичными явлениями в других регионах планеты) и специфики, обусловленной экологическими особенностями региона. Типичность пыле-песчаных бурь (ППБ) в естественных пустынях показана на примере нескольких ППБ в различных регионах. Также типичен конвективный вынос (КВ) аэрозоля с пустынных поверхностей в летнее время, происходящий во всех пустынях, но достаточно изученный только в Казахстане, России (Калмыкия), Таджикистане и Южном Приаралье (ЮП). Специфическим пылевым явлением является вынос солевого аэрозоля с осушенного дна Аральского моря.

Ввиду важности аэрозольного фактора климатических изменений в статье также представлены результаты моделирования влияния пылевых явлений на региональный климат. Количественная оценка влияния КВ на повышение летней приповерхностной температуры, впервые полученная авторами, позволяет расценивать этот форсинг как дополнительный фактор глобального потепления ввиду существенной и возрастающей доли пустынь в суши планеты. Также показана специфичность солепылевых бурь на Аралкуме в аспекте влияния на многолетнюю (1970-2022гг.) динамику климата ЮП.

Ключевые слова: Южного Приаралья, метеорологии, атмосферы, почве, минеральная пыль, изменения климата

DUST PHENOMENA IN THE SOUTHERN ARAL SEA REGION: SPECIFICITY AND TYPICALNESS

B.S. Tleumuratova; Karakalpak Branch of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Nukus, Uzbekistan

Narymbetov B.Zh.; Karakalpak Branch of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Nukus, Uzbekistan

R.G. Sultashov; Karakalpak Branch of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Nukus, Uzbekistan

N.T. Shaudirbaev; Karakalpak State University named after Berdakh, Nukus, Uzbekistan, 1st year Master's student of Geodesy and Geoinformatics

Abstract: The article examines dust phenomena (dust-sand storms, salt-sand storms, convective drift) in the Southern Aral Sea region from the perspective of their typical nature (similarity to similar phenomena in other regions of the planet) and specificity due to the region's ecological characteristics. The typical nature of dust-and-sand storms (DST) in natural deserts is demonstrated by the example of several DSTs in various regions. The convective outflow of aerosol from desert surfaces during summer is also typical, occurring in all deserts, but sufficiently studied only in Kazakhstan, Russia (Kalmykia), Tajikistan, and the Southern Aral Sea region (YuP). A specific dust phenomenon is the removal of salt aerosol from the dried-up bottom of the Aral Sea.

Due to the importance of the aerosol factor of climate change, the article also presents the results of modeling the impact of dust phenomena on regional climate. The quantitative assessment of the impact of solar radiation on the rise in summer surface temperatures, first obtained by the authors, allows us to assess this force as an additional factor of global warming due to the significant and increasing share of deserts on the planet's land. The specificity of salt and dust storms on the Aralkum in terms of their impact on the long-term (1970-2022) climate dynamics of the South Kazakhstan region is also shown.

Keywords: Southern Aral Sea region, meteorology, atmosphere, soil, mineral dust, climate change

Введение. Актуальность исследования пылевых явлений (ПЯ) обусловлена множеством их негативных эффектов и происходящим во многих регионах планеты опустыниванием, понимаемым также как расширение пустынных территорий [28]. Прежде всего чрезмерная запыленность атмосферы влияет на рост заболеваемости населения. Болезни связанные с запыленностью атмосферы возникают при вдыхании частиц пыли вместе с микробами, тяжелыми металлами, пестицидами и другими загрязняющими веществами, содержащимися в почве [7][18]. Благодаря микро- и нано-размерам, поллютанты легко попадают в легкие и проникают в кровотоки. Пылевые бури способствуют росту не только известных заболеваний дыхательной системы [4][6][16], минеральная пыль считается одним из наиболее важных факторов риска сердечнососудистых [2][3], психологических и когнитивных [10][11] заболеваний.

Кроме того, запыленность атмосферы влияет на региональную окружающую среду и климат [29]. Возможные негативные последствия пылевых бурь включают в себя также снижение видимости, опасное для авиа- и автотранспорта; уменьшение прямой солнечной радиации; угнетение растительного покрова и др. [33][37]. Таким образом, актуальность изучения

циклов пустынной пыли (от выноса до переноса на большие расстояния и осадения) заключается в определяющем значении результатов исследований при решении проблем, касающихся изменения климата, погоды, экологических условий, качества воздуха и здоровья человека.

Южное Приаралье, известное как регион, испытывающий максимальное воздействие последствий Аральского кризиса, является также самым запыленным районом Центральной Азии. Этому способствуют не только большие пустынные поверхности, окружающие Южное Приаралье со всех сторон (рис.1а), но и засушливость климата, ветровая активность (среднегодовая скорость ветра 5 м/с [44]), скудость осадков и растительного покрова, способных существенно сдерживать пыление подстилающей поверхности [23][33]. Население ЮП, сосредоточенное в Нижне-амударьинском оазисе, испытывает значительный пылевой стресс, поскольку при любом направлении ветра со скоростью более 7м/с в оазис поступают пылевые потоки с одной из 4 пустынь [22]. Особо опасна пыль с Аралкума (рис.1б), содержащая патогенные сульфаты, представляющие также канцерогенные риски [8][15][19]. Связь выноса солей и пыли из Аралкума с ростом заболеваемости населения Приаралья исследована в основном учеными Казахстана [1][34].

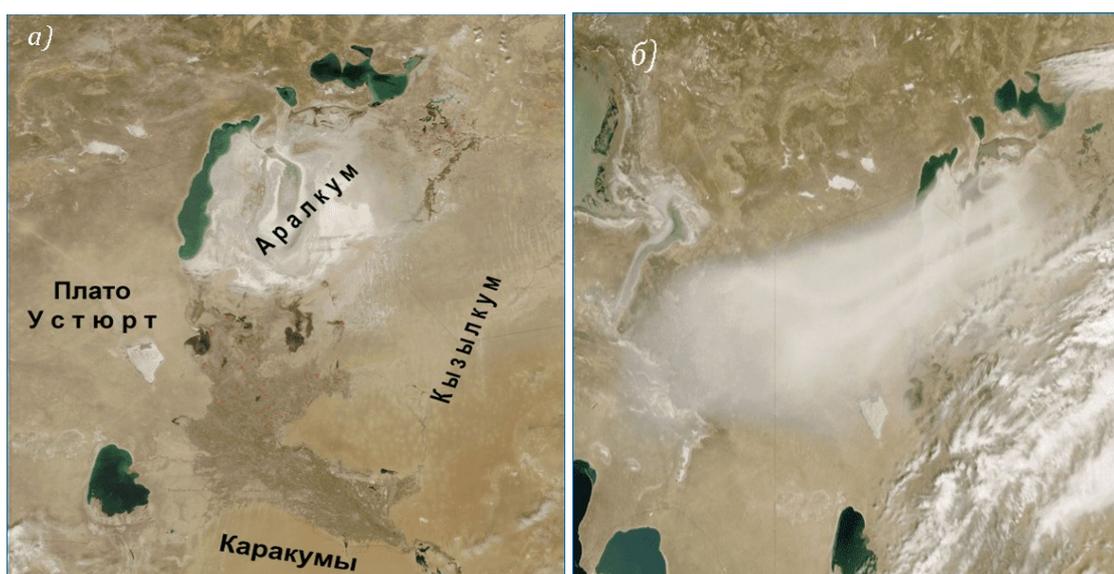


Рисунок 1. Нижне-амударьинский оазис, окруженный пустынями (а), пылевая буря на Аралкуме (б)

Говоря о пылевых явлениях, в метеорологии чаще всего имеют в виду пылевые бури, поземки и мглу, возникающие с усилением ветра. Гораздо реже в научной литературе встречаются работы [26][38], посвященные специфическому пылению пустынных поверхностей – конвективному выносу пыли при условиях, близких к штилевым. Таким образом, пыление поверхности в пустынных зонах в теплое время года (апрель-октябрь) происходит практически ежедневно за исключением дней с осадками.

В Южном Приаралье, типичностью, т.е. закономерностями, общими с другими регионами, обладают ветровое и конвективное пыление на естественных пустынях Устюрт, Кызылкум и Каракумы. Вынос пыли с антропогенной пустыни Аралкум существенно специфичен, если не сказать уникален. Прежде всего это состав и дисперсность мигрирующей пыли, состоящей по разным оценкам на 10-40% из солей. В работе [31] приведена массовая структура минералов, осевших на дно Аральского моря за весь период его высыхания и осолонения с 1960 по 2008 г. (в миллиардах тонн и процентных долях, см. также рис. 2): карбонат кальция – 0,07 (2%); карбонат магния – 0,1 (2%); гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – 2,3 (49%); мирабилит $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ – 1,9 (40%); галит NaCl – 0,4 (8%).

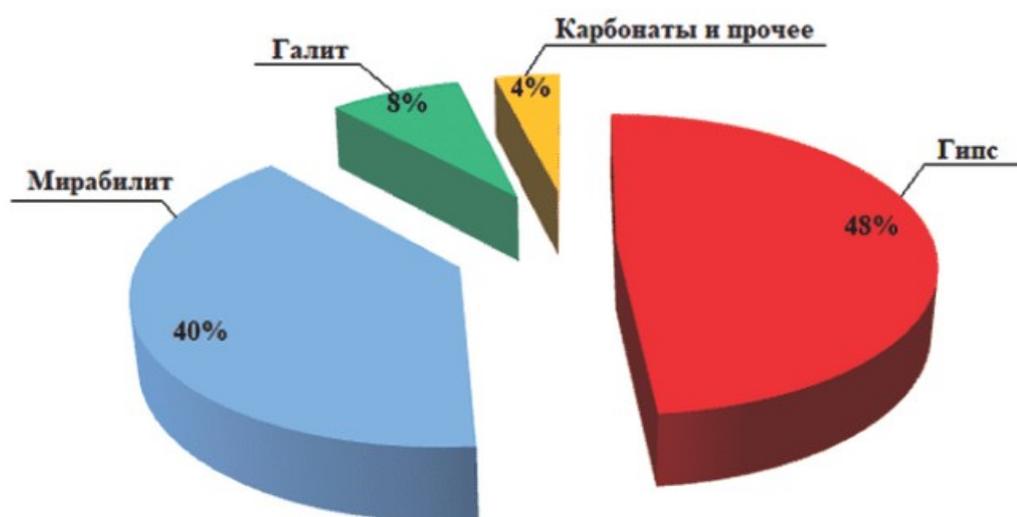


Рис. 2. Структура минералов осушенного дна Аральского моря
Преобладающие в составе минеральной пыли сульфаты легко эродируют, поднимаются на большие высоты и переносятся на расстояния от 300 до 1000 км.

Специфичны и очаги выноса солей, представляющие отдельные разбросанные по осушенному дну корковые и корково-пухлые солончаки. Поэтому штормовая зона выглядит как совокупность отдельных шлейфов с различной протяженностью и мощностью, зависящей от солезапасов в зоне выноса.

В данной работе анализируется типичность и специфика не только собственно процессов пыления в Южном Приаралье, но и таких их последствий, как влияние на запыленность воздуха и климатические изменения.

Материалы и методы. При сравнительном анализе характеристик пылевых явлений в различных регионах использованы синоптические карты [47], данные дистанционного зондирования земли (ДЗЗ), стандартные данные метеорологических станций [50], авторские данные наземных измерений, спутниковые снимки [48], литературные данные. Сравнительный анализ включает сопоставление условий возникновения пылевых явлений, морфометрии шлейфов пыле-песчаных бурь, среднегодовой и разовой (при пыле-песчаной буре) концентрации пыли в приповерхностном слое воздуха.

Влияние пылевых явлений на запыленность воздуха и климат ЮП оценивалось методами моделирования, статистического анализа, дистанционного зондирования земли и контактных наземных измерений.

Для оценки вклада конвективной эмиссии почвенного аэрозоля в повышение летней температуры воздуха нами разработана математическая модель МКВ [39], состоящая из двух блоков. В первом блоке вычисляется массовая концентрация аэрозоля, генерируемая конвективными потоками. Для этого используются эмпирическое соотношение, теоретическое обоснование которого дано в работе [26]

$$\Delta p = 0,12 \delta T^{0,58} \quad (1)$$

где $\Delta\rho$ – отклонение массовой концентрации аэрозольных частиц от фоновой концентрации (мг/м^3), δT – скачок (падение) температуры в термическом пограничном слое, толщина которого варьирует от 10 до 30 см.

Во втором блоке методом частиц *particle-in-cell* [12] вычисляется повышение температуры окружающего воздуха (в слое 0÷3 м) нагретыми взвешенными почвенными частицами [24]. Алгоритм расчетов следующий.

На первом шаге при условии однородности аэрозоля и равномерного распределения в единице объёма, вычисляется нагрев элементарного объёма воздуха, приходящегося на одну частицу. Изотропный поток тепла от нагретой, взвешенной в воздухе сферической частицы равен [41]:

$$Q = 4\pi R \cdot k_B \cdot T_B \cdot f \quad (3)$$

где T_B – температура воздуха, R – радиус аэрозольной частицы, k_B – коэффициент теплопроводности воздуха при данной температуре. Коэффициент f определяется по формуле [41]:

$$f = \frac{t^{1+\omega} - 1}{1 + \omega} \quad (4)$$

где $t = t_p - \Delta t$, $t_p = T_p / T_B$ – безразмерная температура поверхности частицы, T_p – температура поверхности частицы, равная с точностью до 1,5% температуре поверхности почвы. Значение ω для воздуха равно 0,85 [25]. Изменение температуры Δt определяется выражением [41]:

$$\Delta t = \frac{A_1 - \sqrt{A_1^2 - 4A_0A_2}}{2A_2}, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} A_0 &= \varepsilon(t_p^2 - t_p^{1-\omega}) \\ A_1 &= \left(1 + \varepsilon(2t_p - (1-\omega)t_p^{-\omega})\right) \\ A_2 &= \varepsilon\left(1 + \frac{\omega(1-\omega)}{2} \cdot t_p^{-(1+\omega)}\right) \\ \varepsilon &= \frac{C_T}{1+\omega} \left(\frac{\lambda}{R}\right), \end{aligned} \quad (6)$$

C_T – коэффициент скачка температуры $\approx 2,2$ [32][42], λ – длина свободного пробега молекулы воздуха

$$\lambda = \frac{kT_B}{\sqrt{2}\pi d^2 p} . \quad (7)$$

В соотношении (7) $d = 3,6 \cdot 10^{-10}$ м – диаметр молекулы воздуха, p – атмосферное давление, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

По отклонению массовой концентрации аэрозоля $\Delta\rho$, вычисленной в первом блоке модели, определяется счётная концентрация N и объём воздуха dV , занимаемый одной частицей. При этом предполагается, что стенки dV непроницаемы, а объём dV инвариантен относительно размера и химического состава частицы.

Результаты моделирования верифицированы полевыми измерениями температуры воздуха и подстилающей поверхности, концентрации аэрозоля счетчиком аэрозоля (диапазон $0,3 \div 10$ мкм).

Ветровой вынос солей с Аралкума является важной компонентой (наряду с сокращением акватории) механизма влияния усыхания Аральского моря на климатические изменения в Приаралье [27][37]. На основе аппроксимации результатов численного моделирования [37] нами построена модель многолетней пространственно-временной динамики влияния усыхания Аральского моря на такие климатические характеристики, как температура и относительная влажность воздуха, годовое количество осадков [20].

Для определения пространственно-временной динамики запыленности приземного (на уровне 2 м) воздуха в Нижне-амударьинском оазисе разработана статистическая модель МДЗА [40], в основу которой положена версия гауссовой модели [9].

Результаты и обсуждение.

Типичность пылевых явлений. Общность пыле-песчаных бурь (ППБ) в различных регионах Земли прежде всего заключается в условиях их

возникновения. Метеорологические условия (такие процессы общей циркуляции атмосферы, как циклоны, холодные вторжения) общеизвестны. Отметим только, что наиболее часто в Южном Приаралье наблюдаются пыле-песчаные бури холодного фронта, возникающие на южной и юго-восточной периферии циклонов,двигающихся с запада (рис.3).

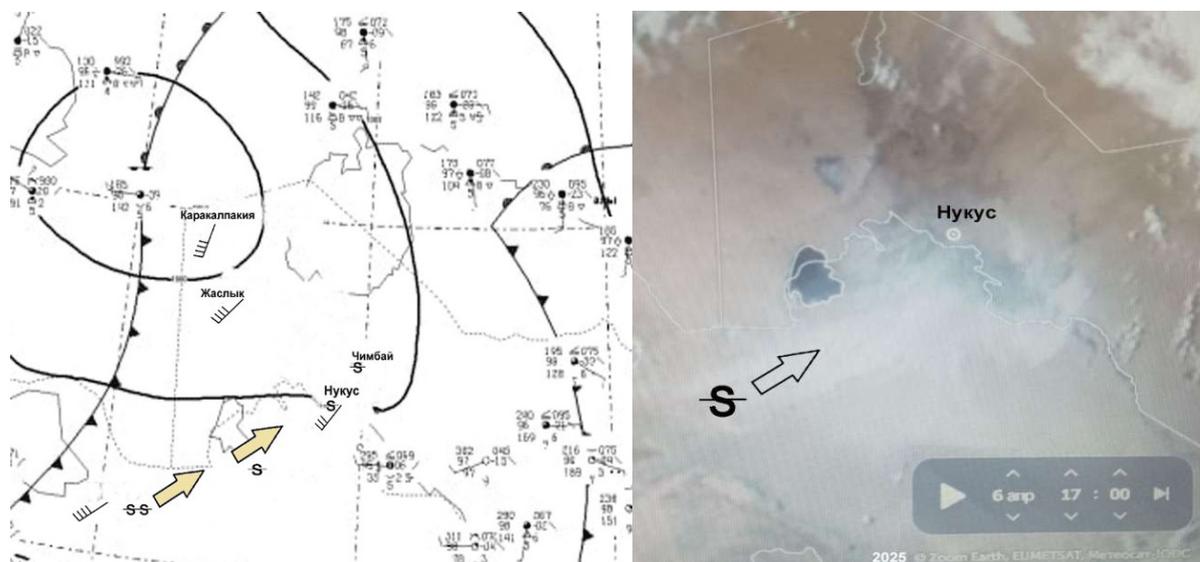


Рисунок 3. Синоптическая карта и космоснимок пыле-песчаной бури (6 апреля 2025г.) [47]

Эколого-климатическими условиями возникновения пыле-песчаных бурь, как также известно, являются засушливость и подстилающая поверхность с низким (0-0,4) проективным покрытием растений.

Типичным в современных условиях является увеличение повторяемости ППБ [36] наряду с такими экстремальными явлениями как тайфуны, наводнения, вследствие глобального потепления, обуславливающего возрастание энергии атмосферных процессов. К примеру, выполненный авторами статистический анализ показал увеличение повторяемости пыле-песчаных бурь в ЮП в периоде 2000-2024 гг. на 6,7% в год [36].

Типичными для ППБ являются визуальные характеристики, наблюдаемые на спутниковых снимках (рис.4). Расплывчатость шлейфов пыле-песчаных бурь на естественных пустынях объясняется большой площадью очагов пыли и достаточно большим коэффициентом поперечной

турбулентной диффузии, слабо подавляемой при скоростях ветра менее 20 м/с, характерных для средних ППБ. Кроме того, сепарация частиц по размерам, происходящая при движении пылевого потока и логарифмический профиль ветра, обуславливают мелкодисперсность периферии шлейфа (PM₄), и, следовательно, меньшую отражательную способность.

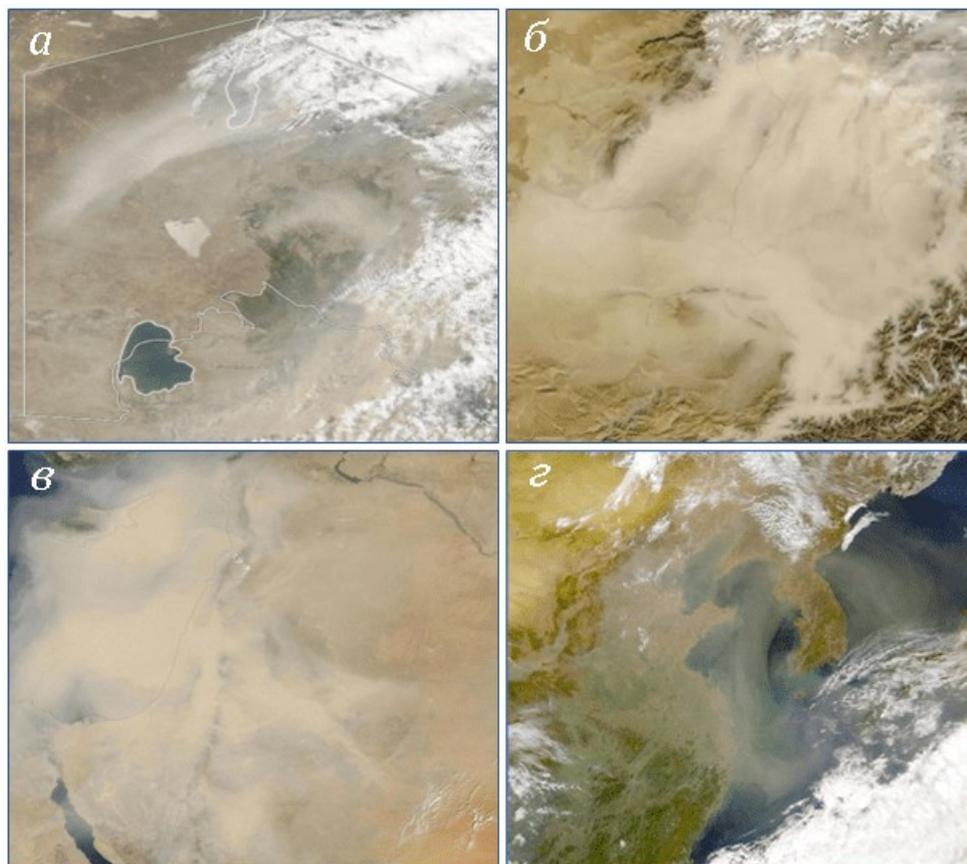


Рисунок 4. Пылевые бури в различных регионах планеты: а) Южное Приаралье, б) Австралия, в) Ближний Восток, г) Китай [48]

Приземная концентрация пыли при скорости ветра менее 10-15 м/с во всех регионах не превышает 2 мг/м³ [13][14][17]. При сильных экстремальных ППБ (рис.5) концентрация пыли возрастает на порядок.

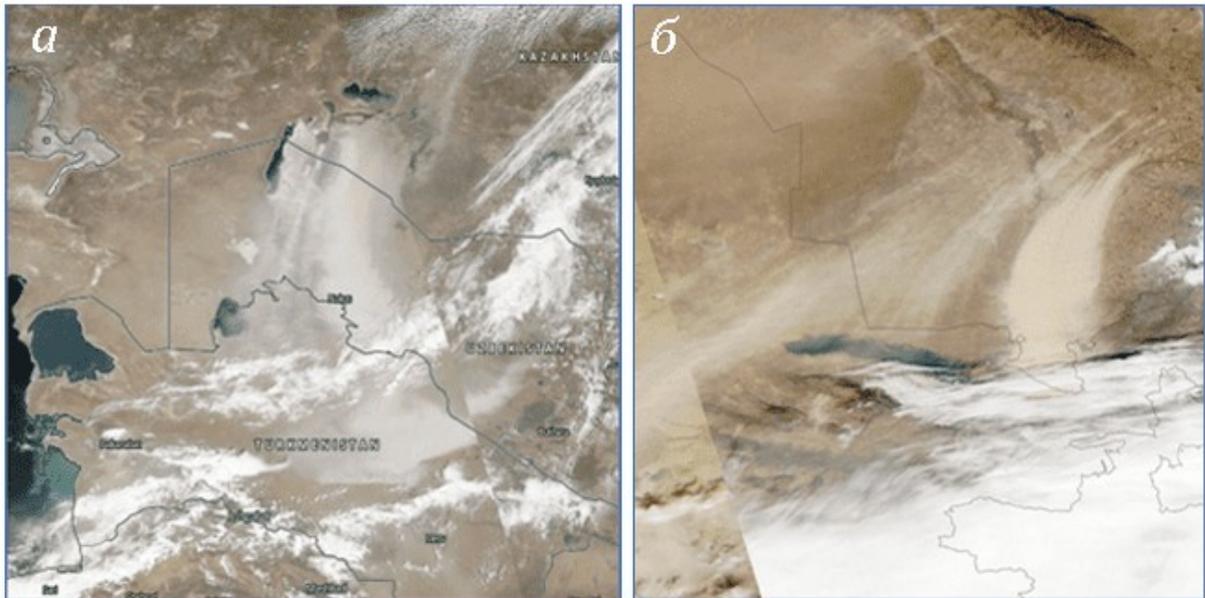


Рис. 5. Экстремальные пылевые бури: а) на Аралкуме 27 мая 2018г. [49]; б) в Центральной Азии 4 ноября 2021 года [45]

Так, при солепылевой буре на Аралкуме 27 мая 2018г. концентрация пыли в г.Нукусе (450 км от очага) превышала 20 мг/м^3 , при ППБ 4 ноября 2021 года в Ташкенте (600 км от очага) концентрация PM_{10} достигла 18 мг/м^3 [17], в Австралии (9 февраля 1996 г., пустыня Симпсон) – 27 мг/м^3 [13].

Замеры счетной концентрации пыли, проведенные нами в Нукусе во время умеренного ветра 2 апреля и ППБ 4 апреля 2025 года показали следующее:

Таблица 1. Концентрация пыли при умеренном ветре и во время ППБ

| Время | Скорость ветра | Число частиц | Размер частиц R, мкм | | | | | | Массовая концентрация, мг/м^3 |
|-------------------|----------------|--------------|----------------------|--------|--------|-------|-------|------|--|
| | | | 0.3 | 0.5 | 1 | 3 | 5 | 10 | |
| 02.04.2025 12-00. | 8 м/с | | 37893 | 17010 | 5934 | 2462 | 799 | 209 | 1,86 |
| 02.04.2025 12-30. | | | 32681 | 14050 | 4448 | 1214 | 289 | 55 | 0,63 |
| 02.04.2025 12-50. | | | 34004 | 15384 | 5470 | 2011 | 642 | 166 | 1,5 |
| 06.04.2025 17-00. | 22 м/с | | 165105 | 148795 | 107965 | 43875 | 10121 | 1837 | 21,4 |
| 06.04.2025 17-30. | | | 108582 | 92269 | 61493 | 20266 | 3206 | 388 | 6,84 |
| 06.04.2025 17-45. | | | 132356 | 115575 | 82806 | 32833 | 7384 | 1284 | 15,47 |

Таким образом данные контактных наземных измерений концентрации пыли в ЮП в обычных условиях и во время пыле-песчаной бури колеблются в тех же пределах. Как видим, пыле-песчаные бури на естественных пустынях Южного Приаралья по физике процесса в целом не отличаются от пыле-песчаных бурь на других пустынях.

Также типичен конвективный вынос пыли в естественных пустынях [21], различия могут быть в дисперсности и массе выносимой конвективными потоками пыли, а также воздействию этой пыли на приповерхностную температуру воздуха.

Численные эксперименты с моделью МКВ с различными вариантами функций распределения размеров частиц и веществ, а также толщины термического пограничного слоя выявили, что приращение конвективным выносом температуры ΔT наиболее чувствительно к вариациям дисперсности [21]. На рис.6, отображающем результаты расчетов для монодисперсного аэрозоля видно, что максимальные значения ΔT соответствуют $PM_{0,5}$, преобладающей как при ППБ, так и при КВ, фракции пыли (табл.1).

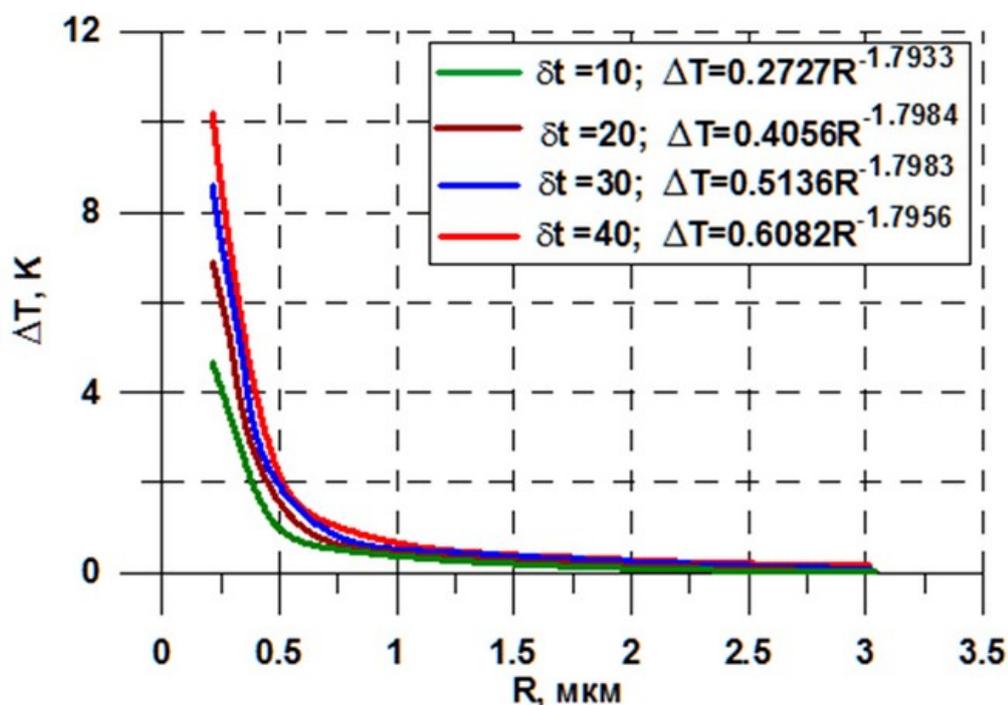


Рис.6. Зависимость изменения ΔT от радиуса частиц монодисперсного аэрозоля и толщины термического пограничного слоя (июнь).

Расчеты по модели и полевые измерения показали, что для условий Южного Приаралья в летние месяцы тепловой эффект конвективного выноса может достигать 2-3°C. Согласно нашим расчетам, вклад конвективного выноса в произошедшее за последние два десятилетия в Южном Приаралье потепление летнего сезона оценивается как 10-30% [5].

Значение форсинга летних температур воздуха при конвективном выносе аэрозоля возрастает ввиду прогрессирующего опустынивания во многих регионах земного шара (рис.7).

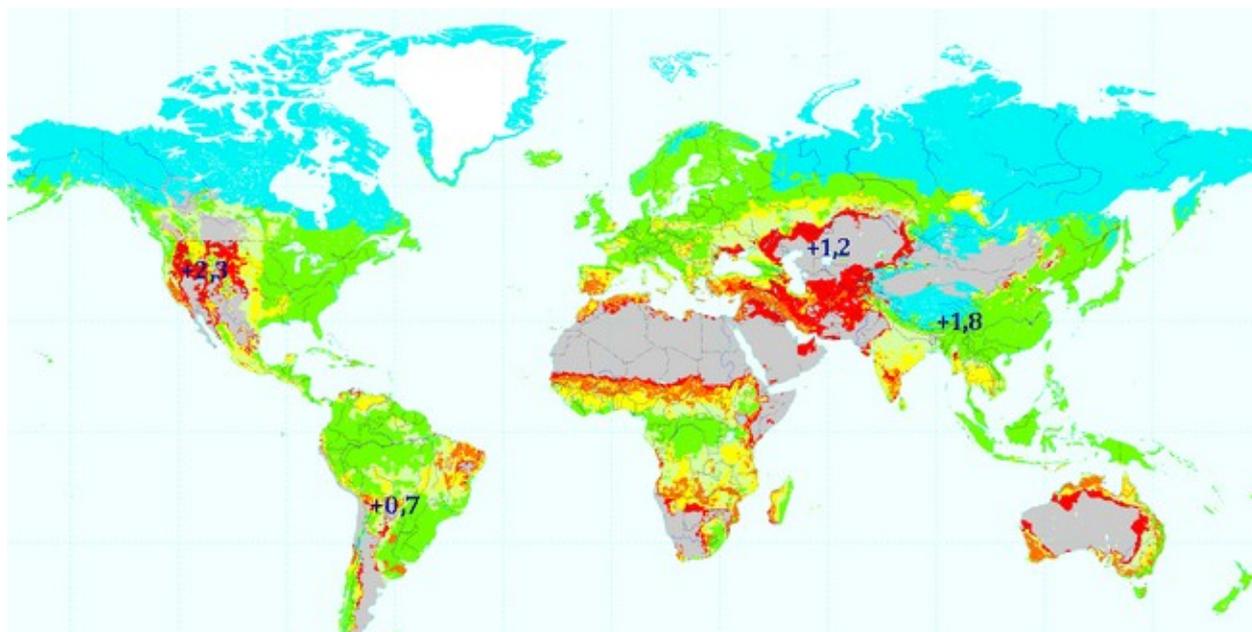


Рис. 7. Карта опустынивания Земли: зеленый цвет – низкая угроза опустынивания, жёлтый цвет – умеренная угроза, красный – очень высокая угроза [43]

На рис.7 цифры указывают мировые температурные аномалии в аридных зонах в привязке к базовым климатическим условиям 1979-2000 годов. Исходные данные получены из версии 5 реанализа Европейского центра (ERA 5) [46].

Несложные расчеты в соответствии с разработанной моделью показывают, что увеличение пустынных площадей на 6500 тыс. кв. км (красный цвет на рис. 7) может привести к повышению средней глобальной температуры на 5-14% в зависимости от дисперсности пустынных поверхностей.

Необходимо отметить, что повышенная при дневном КВ концентрация аэрозоля и частично сохраняющаяся ночью вследствие незначительности осаждения частиц, сдерживает ночное излучение из-за поглощающих свойств почвенного аэрозоля, что усиливает среднесуточный тепляющий эффект конвективного выноса в приповерхностных слоях воздуха.

Специфика пылевых явлений в Южном Приаралье определяется обширностью пустынных территорий и наличием уникальной антропогенной соляной пустыни Аралкум, обладающей особенностями воздействия на запыленность воздуха и климатические изменения в Южном Приаралье.

Результаты расчетов по модели МДЗА показали, что особенности географического расположения Нижне-амударьинского оазиса, ветрового режима с преобладанием северной половины румбов и расширение Аралкума определяют особенности динамики запыленности воздуха в регионе (рис.8).

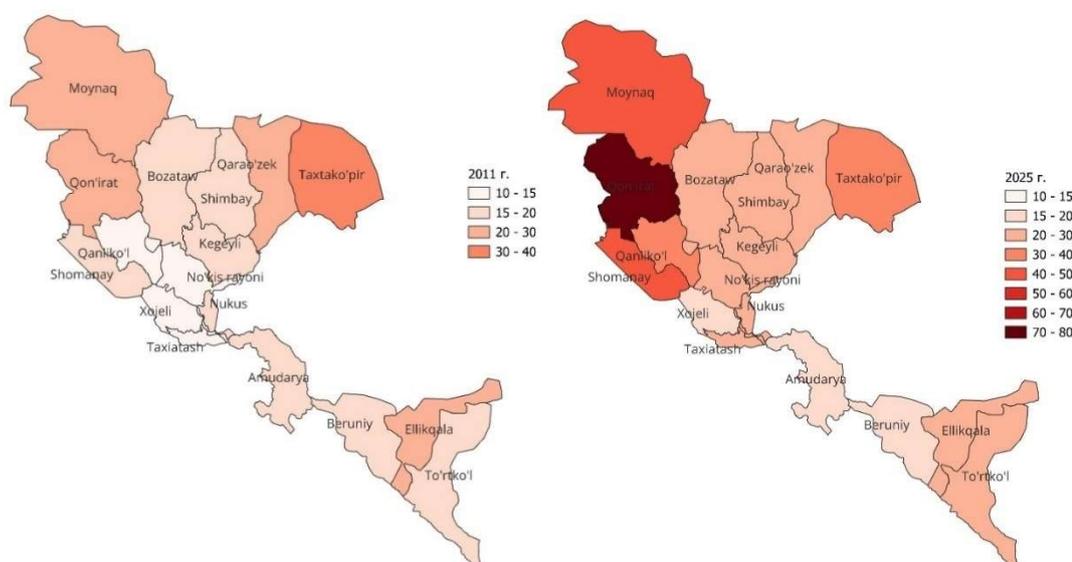


Рисунок 8. Карта пространственной динамики запыленности атмосферы в Каракалпакистане за 2011 (слева) и 2025 (справа) годы.

Всесторонний анализ факторов, влияющих на уровень запыленности в 5 странах Ближнего Востока (Ирак, Иран, Кувейт, Сирия и Саудовская Аравия), основанный на данных о приземной концентрации пыли, метеорологических данных и вегетационном индексе за период с 2001 по 2017 год, показал, что уровень запыленности в Кувейте выше, чем в других странах, со средней концентрацией пыли на поверхности земли 0,53 мг/куб.м

и ежегодной тенденцией к увеличению на уровне 0,0014 мг/(куб.м в год) [14]. Аналогичная тенденция в ЮП составляет 0,0027 мг/(куб.м в год), что вдвое больше чем в самой запыленной стране Ближнего Востока. Таким образом, специфика пылевых явлений в ЮП проявляется, в частности, в более высокой динамике роста запыленности атмосферы относительно других регионов.

Специфика пыли с Аралкума заключается в особом воздействии на региональный климат ввиду высокого содержания в ее составе сульфатов, являющихся активными ядрами конденсации, приводящими к увеличению количества осадков и рассеивающим аэрозолям, понижающим температуру воздуха.

По результатам моделирования нами определена многолетняя пространственно-временная динамика влияния усыхания Аральского моря на такие климатические характеристики, как температура и относительная влажность воздуха, годовое количество осадков (рис.9) [20]. Влияние усыхания Аральского моря на климатические изменения рассматривалось как совокупное влияние сокращения акватории моря и выноса солей с осушенного дна.

Системное воздействие усыхания Аральского моря на температуру воздуха на всем протяжении периода моделирования остается охлаждающим, меняется только соотношение вкладов сокращения акватории и выноса солей. В 1966-1975гг. ввиду незначительности выноса солей, как отчетливо видно на рисунке 9, преобладало влияние акватории моря. В среднем по региону охлаждающее влияние усыхающего моря равно 2°C.

Отклонения количества осадков, вызванные выносом солей, достигают максимума при значении концентрации солей $C \approx 100$ мкг/м³ на уровне конденсации (1986-1995гг.), затем начинают уменьшаться [20], далее аэрозольный эффект снижается до 5 мм/год и выражается в торможении стока и увеличении жизни облаков, но область влияния, как видно на

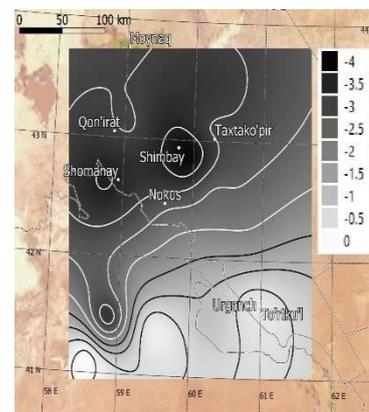
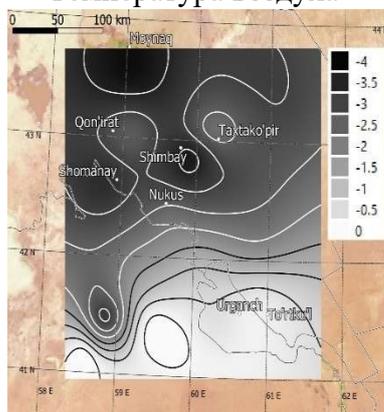
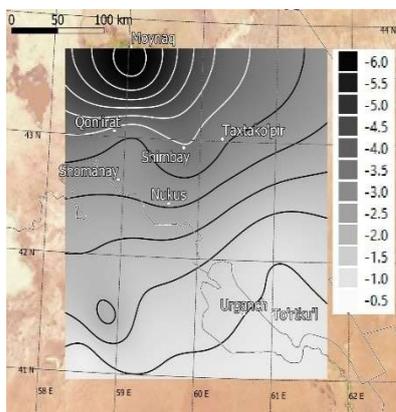
рисунке 9, непрерывно расширяется вследствие увеличения годового объема выноса солей с Аралкума.

1966-1975

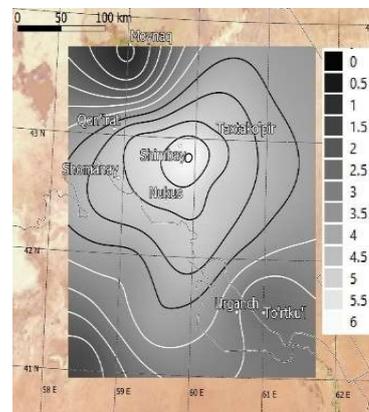
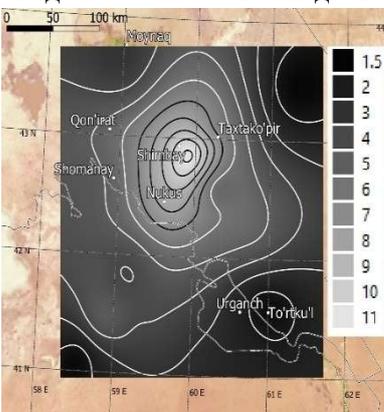
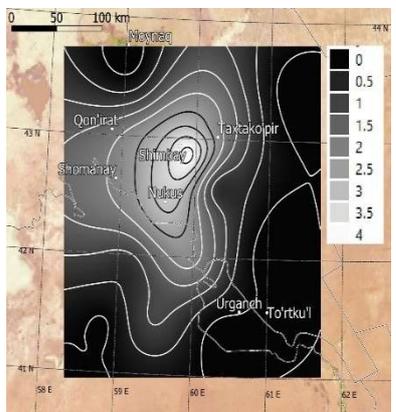
1986-1995

2006-2015

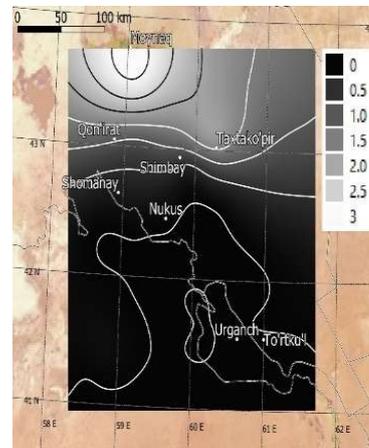
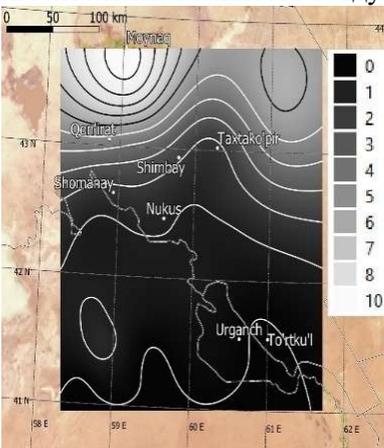
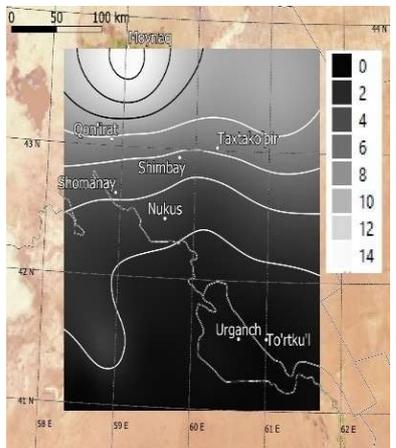
Температура воздуха



Годовое количество осадков



Относительная влажность воздуха



*Рисунок 9. Динамика отклонений метеохарактеристик, обусловленных
усыхание Аральского моря*

В ходе численных экспериментов выяснилось, что прямое влияние выноса солей на относительную влажность воздуха менее 0,5%, но косвенное влияние (через понижение температуры воздуха) несколько (до 1,5-2%) компенсирует уменьшение относительной влажности воздуха, обусловленное сокращением акватории моря. Динамика влияния усыхания Аральского моря на относительную влажность воздуха устойчиво отрицательная. Наблюдаемые метеостанциями изменения [35] годового количества осадков подтверждают результаты моделирования, хотя могут быть ниже модельных ввиду происходящих вследствие высоких летних температур воздуха, разрушения облаков и испарения выпадающих из них капель.

Результаты же по температуре и относительной влажности воздуха не могут верифицироваться с данными метеостанций, поскольку последние отражают суммарный эффект всех факторов, в том числе глобального потепления, деградации растительного покрова, влияния окружающих пустынь (эффект Воейкова для запыленных зон) и др.

Выводы. На современном этапе исследований климата важное значение придается региональной изменчивости аэрозольно-радиационного форсинга. Этот аспект в данной работе является основным проявлением своеобразия пылевых явлений в Южном Приаралье.

В целом *типичность* пылевых явлений присуща пыле-песчаным бурям и конвективному выносу в естественных пустынях. Эти процессы протекают в Южном Приаралье по достаточно изученным закономерностям, общим для всех пустынных территорий. В частности, это возникновение пыле-песчаных бурь вследствие определенных метеоусловий, размытость шлейфа, присущая большим площадным источникам пылевыноса, образование пылевой дымки, снижение приповерхностной температуры воздуха и др.

Существенность конвективного выноса субмикронного аэрозоля с пустынных поверхностей, установленная натурными наблюдениями в различных регионах (Калмыкия, Таджикистан, Казахстан), вкупе с расширением опустынивающихся территорий обуславливает его значимость как климатического фактора.

Поскольку в модели МКВ отсутствуют данные, характерные исключительно для Южного Приаралья, результаты исследования приложимы к другим пустынным регионам при наличии периодов с указанными выше метеорологическими ситуациями.

Ввиду актуальности синергетически связанных процессов опустынивания и потепления климата необходимы дальнейшие исследования отепляющего эффекта конвективного выноса аэрозоля с пустынных поверхностей с учетом скорости конвекции, турбулентной диффузии, нелинейных эффектов, вертикальных градиентов и теплообмена пустынных участков с соседними качественно отличающимися ландшафтами и особенно с учетом влияния растительного покрова.

Специфика пылевых явлений в Южном Приаралье связана прежде всего с выносом солевого аэрозоля с пустыни Аралкум. На фоне глобального потепления понижение температуры воздуха и увеличение количества осадков солевым аэрозолем выглядит благоприятным эффектом, который, однако, не компенсирует негативный эффект – влияние на здоровье населения и засоление орошаемых территорий.

Другая особенность пылевых явлений в ЮП обусловлена географическими (средоточие 4 крупных пустынь) и экологическими (Аральский кризис) условиями. Эта особенность заключается в высокой относительно других регионов динамике запыленности атмосферы, а также продолжающемся расширении соляной пустыни Аралкум как очага солепылевых бурь с выносом патогенных сульфатов.

Дестабилизация экосистемы Арала и Приаралья – усыхание Аральского моря, опустынивание, деградация растительного покрова – обуславливает прогрессирующее негативное значение пылевых явлений в ЮП для населения не только Приаралья, но и более отдаленных территорий.

Наблюдаемые в последнее время масштабные пылевые бури (27 мая 2018г., 4 ноября 2021г.) имеют еще более значимые негативные воздействия. К примеру, осаждение пылевого материала на ледниках гор Центральной Азии ускоряют их таяние вследствие уменьшения альбедо, что усугубляет и без того острую проблему водных ресурсов в регионе.

Ввиду всего вышесказанного безусловно актуальны разработки мер ослабления пылевых явлений в Приаралье в целом. Недостаточная эффективность фитомелиорации на ОДА, оценена нами методами моделирования в 10-15%% сдерживания выноса солей [30]. В связи с этим более перспективной мерой представляется искусственное осадкообразование накануне прогнозируемого сильного ветра. К примеру, во время вышеприведенной ППБ 6 апреля 2025 пыление отсутствовало на севере Устюрта и Кызылкума, где непосредственно перед пыле-песчаной бурей прошел небольшой дождь 0,6 мм, что говорит о значимости осадков, даже небольших, для подавления миграции пыли.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Академии наук Республики Узбекистан, грантов Министерства инновационного развития Республики Узбекистан «Моделирование эколого-метеорологических процессов в зонах опустынивания Южного Приаралья, приводящих к потеплению регионального климата» и «Количественная оценка метеорологических и экологических условий прогноза пылевых бурь на осушенном дне Аральского моря».

Список литературы:

1. Abitayev D.S., Tatkeev T.A., Rakhimbekov M.S., Attshabarova S.S., Rahmetullaev B.B. Complex influence of environmental factors on public health of Aral sea region // Гигиена труда и медицинская экология. - 2014. - № 1. – С.13-18.

2. Aghababaeian H. et al. Global health impacts of dust storms: a systematic review // *Environmental health insights*. – 2021. – Т. 15. – С. 11786302211018390.
3. Aili A., Oanh N. T. K. Effects of dust storm on public health in desert fringe area: case study of northeast edge of Taklimakan Desert, China // *Atmospheric Pollution Research*. – 2015. – Т. 6. – №. 5. – С. 805-814.
4. Al-Hemoud A., Al-Dousari A., Al-Shatti A., Al-Khayat A., Mariam Malak B. Health Impact Assessment Associated with Exposure to PM10 and Dust Storms in Kuwait. *Environmental Science*. 2018.
5. Arushanov M., Tleumuratova B., Narymbetov B. Increase in surface air temperature as a result of convective aerosol removal to desert territories. // *Norwegian Journal of development of the International Science No 120/2023*, p.117-123. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10138721>
6. Bartzokas A, Kassomenos P, Petrakis M, Celesides C. The effect of meteorological and pollution parameters on the frequency of hospital admissions for cardiovascular and respiratory problems in Athens. *Indoor Built Environ* 13:271–275. 2003.
7. Bozlaker A. et al. Quantifying the contribution of long-range Saharan dust transport on particulate matter concentrations in Houston, Texas, using detailed elemental analysis // *Environmental science & technology*. – 2013. – Т. 47. – №. 18. – С. 10179-10187.
8. Crouse D. L. et al. A new method to jointly estimate the mortality risk of long-term exposure to fine particulate matter and its components // *Scientific reports*. – 2016. – Т. 6. – №. 1. – С. 18916.
9. Ermak D.L. An analytical model for air pollutant transport and deposition from a point source // *Atmospheric Environment (1967)*. – 1977. – Т. 11. – №. 3. – С. 231-237.
10. Ghaisas S., Maher J., Kanthasamy A. Gut microbiome in health and disease: Linking the microbiome–gut–brain axis and environmental factors in the pathogenesis of systemic and neurodegenerative diseases // *Pharmacology & therapeutics*. – 2016. – Т. 158. – С. 52-62.
11. Gordeev S. A. et al. Psychophysiological characteristics of panic disorder and generalized anxiety disorder // *Zhurnal nevrologii i psikiatrii imeni SS Korsakova*. – 2013. – Т. 113. – №. 5. – С. 11-14.
12. Harlow F.H. The particle-in-cell method for numerical solution of problems in fluid dynamics. Los Alamos Scientific Lab., N. Mex., 1962. №. LADC-5288.
13. Hua Lu, Yaping Shao. Toward quantitative prediction of dust storms: an integrated wind erosion modelling system and its applications. *Environmental Modelling & Software* 16 (2001) 233–249.
14. Jing Li, Eric Garshick, Ali Al-Hemoud, Shaodan Huang, Petros Koutrakis. Impacts of meteorology and vegetation on surface dust concentrations in Middle Eastern countries. *Science of the Total Environment* 712 (2020)
15. Meng X. et al. A satellite-driven model to estimate long-term particulate sulfate levels and attributable mortality burden in China // *Environment international*. – 2023. – Т. 171. – С. 107740.
16. Nastos, P.T., Kampanis, N.A., Giaouzaki, K.N. & Matzarakis, A. Environmental impacts on human health during a Saharan dust episode at Crete Island, Greece. *Meteorologische Zeitschrift* 20, 517 – 529. 2011.
17. Parya Broomandi et al. A Synoptic- and Remote Sensing-based Analysis of a Severe Dust Storm Event over Central Asia. *Aerosol and Air Quality Research*. Volume 23. 2023.

18. Sanchez de la Campa A. et al. Chemical and microbiological characterization of atmospheric particulate matter during an intense African dust event in Southern Spain // *Environmental science & technology*. – 2013. – Т. 47. – №. 8. – С. 3630-3638.
19. Thurston G.D. et al. Ischemic heart disease mortality and long-term exposure to source-related components of US fine particle air pollution // *Environmental health perspectives*. – 2016. – Т. 124. – №. 6. – С. 785-794.
20. Tleumuratova B., Urazimbetova E., Statov V. Multiyear dynamics of the Aral sea desiccation impact on the Southern Priaralie climate. *BIO Web Conf.*, 130 (2024) 03004. DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/202413003004>
21. Tleumuratova B.S., Narymbetov B.Zh. Convective Aerosol Transport in Desert Zones as a Factor of Increasing Air Temperature. ISSN 2079-0961, *Arid Ecosystems*, 2022, Vol. 12, No. 1, pp. 8–14.
22. Urazimbetova E.P., Tleumuratova B.S. Modeling and Evaluation of Dust Suppression Measures in the Lower Amudarya Oasis // *Наука и образование в Каракалпакстане*. – 2025. – №2. – С.90–95.
23. Wu J. Modelling the energy exchange processes between plant communities and environment// *Ecological Modelling*.–1990. – № 53. – Pp. 233–250.
24. Арушанов М.Л., Тлемуратова Б.С., Нарымбетов Б.Ж. Аэрозольный форсинг приповерхностной температуры//*Гидрометеорология и мониторинг окружающей среды*, №2. – 2023. – С. 23-33.
25. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. // М.: Наука. – 1972. – 720 с.
26. Гледзер Е.Б., Гранберг И.Г., Чхетиани О.Г. Конвективные потоки аэрозоля вблизи поверхности почвы / *Доклады РАН*. – 2009. – т.426. –№3. – с.380-385.
27. Григорьев А.А., Липатов В.Б. Пыльные бури по данным космических исследований.– Л.:Гидрометеиздат, 1985.– 31с.
28. Золотокрылин А.Н. Климатическое опустынивание. – М.: Наука, 2003. – 246 с.
29. Кондратьев К.Я. Аэрозоль и климат. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. –541с.
30. Кубланов Ж.Ж., Тлеумуратова Б.С. Оценка эффективности антропогенных воздействий на осушенном дне Аральского моря по ослаблению выноса солей // *Universum: химия и биология : электрон. научн. журн*. 2023. 2(104).
31. Курбаниязов А.К. Эволюция ландшафтов обсохшего дна Аральского моря. Монография. Москва, 2017.
32. Латышев А.В., Юшканов А.А. Аналитическое решение модельного БГК- уравнения Больцмана в задаче о температурном скачке с учетом аккомодации энергии. // *Математическое моделирование*. – 1992. – с.61-66.
33. Ли Цзин, Гаршик Э., Аль-Хемуд Али, Шаодан Хуан, Кутракис П. Воздействие метеорологии и растительности на концентрацию приземной пыли в странах ближнего востока. [Science of The Total Environment Volume 712](#), 10 April 2020, 136597.
34. Мажитова З.Х., Сейсебаева Р.Ж., Умбетова Л.Ж. Новые болезни органов дыхания у детей проживающих в условиях загрязнения воздушного бассейна пыле-солевыми частицами. – 2005.
35. Субботина О.И., Чанышева С.Г. Климат Приаралья. - Ташкент 2006, 172 стр.
36. Султашов Р.Г, Тлеумуратова Б.С, Нарымбетов Б.Ж., Кубланов Ж.Ж. Мониторинг и анализ пылевых бурь в Южном Приаралье. Юниверсум. 2025.

37. Тлеумуратова Б.С. Математическое моделирование влияния трансформаций экосистемы Южного Приаралья на почвенно-климатические условия: Дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. – Ташкент., 2018. –224 с.
38. Тлеумуратова Б.С., Нарымбетов Б.Ж. Конвективный вынос аэрозоля в пустынных зонах как фактор повышения температуры воздуха // Аридные экосистемы. Т. 28, №1(90). – 2022. – С. 11-19.
39. Тлеумуратова Б.С., Нарымбетов Б.Ж. Математическая модель влияния конвективного выноса аэрозоля на приземную температуру воздуха.//Universum: технические науки: электрон.научн. журн. 2023. 8(113). С.15-18.
40. Уразымбетова Э.П. Моделирование запыленности атмосферы Каракалпакстана пустыней Кызылкум //Экономика и социум. – 2024. – №. 4-1 (119). – С. 1126-1131.
41. Щукин Е.Р., Малай Н.В., Шулиманова З.Л. Молекулярный теплообмен с газообразной средой сильно нагретой неподвижной твердой умеренно крупной сферической частицы. / Научные ведомости БелГУ. – 2012. –№23(142) . – вып.29. – с.86-92.
42. Яламов Ю.И., Поддоскин А.Б., Юшканов А.А. О граничных условиях при обтекании неоднородно нагретым газом сферической поверхности малой кривизны. // ДАН СССР. – 1980. – 254. – с.343-346.
43. Desertification vulnerability. US Department of Agriculture. 1998
44. <https://ru.weatherspark.com>
45. <https://worldview.earthdata.nasa.gov>
46. IPCC Fourth Assessment Report
47. lance.modaps.eosdis.nasa.gov
48. NASA Goddard Space
49. NASA/NOAA Suomi NPP/VIIRS
50. Архив Каракалпакского управления гидрометеорологии