

*Тлеумуратова Б.С.*

*Заведующая лаборатории Каракалпакского научно-исследовательского института естественных наук ККО АН РУз*

*Уразымбетова Э.П.*

*базовый докторант Каракалпакского научно-исследовательского института естественных наук ККО АН РУз,  
ассистент преподаватель Каракалпакского государственного университета имени Бердаха*

## **МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА ЗАПЫЛЕННОСТИ АТМОСФЕРЫ В НИЖНЕ-АМУДАРЬИНСКОМ ОАЗИСЕ**

*Аннотация. Как известно, чрезмерная запыленность атмосферы имеет множество негативных последствий. Прежде всего это рост различных заболеваний, включая онкологические, кардиоваскулярные, нейродегенеративные и др. В данной работе методами статистического моделирования количественно оценена многолетняя динамика (1961-2020гг.) запыленности атмосферы в наиболее густонаселенной части Южного Приаралья – Нижне-амударьинском оазисе, окруженного со всех сторон пустынями Аралкум, Устюрт, Кызылкум и Каракумы. Многолетняя динамика факторов – ветрового режима, количества осадков, растительного покрова и площади пустынных поверхностей – аппроксимирована регрессионными уравнениями, полученными в ходе статистической обработки фактических данных. Результаты исследования свидетельствуют о прогрессирующем характере запыленности атмосферы в Нижне-амударьинском оазисе, вследствие отрицательной динамики ослабляющих запыленность атмосферы*

факторов (количества осадков, растительного покрова) и положительной динамики усиливающих запыленность атмосферы факторов (ветрового режима и площади пустынь).

*Ключевые слова:* многолетняя динамика, запыленность атмосферы, Нижне-амударьинский оазис, статистический анализ, общее проективное покрытие, моделирование.

***Tleumuratova B.S.***

***Head of the laboratory of the Karakalpak Research Institute of Natural Sciences, Karakalpak Branch of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan***

***Urazimbetova E.P.***

***Basic doctoral student of the Karakalpak Research Institute of Natural Sciences, Karakalpak Branch of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan,  
Assistant teacher of the Karakalpak State University named after Berdakh***

## **LONG-TERM DYNAMICS OF ATMOSPHERIC DUST CONTENT IN THE LOWER AMUDARYA OASIS**

*Annotation. As is known, excessive dustiness of the atmosphere has many negative consequences. First of all, this is an increase in various diseases, including cancer, cardiovascular, neurodegenerative, etc. In this paper, statistical modeling methods are used to quantitatively assess the long-term dynamics (1961-2020) of atmospheric dustiness in the most densely populated part of the Southern Aral Sea region - the Lower Amudarya oasis, surrounded on all sides by the Aralkum, Ustyurt, Kyzylkum and Karakum deserts. The long-term dynamics of factors - wind regime, precipitation amount, vegetation cover and desert surface area - are approximated by regression equations obtained*

*during statistical processing of factual data. The results of the study indicate a progressive nature of atmospheric dustiness in the Lower Amudarya oasis, due to the negative dynamics of factors weakening atmospheric dustiness (precipitation amount, vegetation cover) and the positive dynamics of factors increasing atmospheric dustiness (wind regime and desert area).*

*Key words: long-term dynamics, atmospheric dustiness, Lower Amudarya oasis, statistical analysis, total projective coverage, modeling.*

**Введение.** Запыленность атмосферы (ЗА) является важной частью глобальной проблемы загрязнения окружающей среды. Значительную часть загрязняющих веществ составляет пыль как промышленного, так и естественного происхождения. Природные источники атмосферной пыли (пустынные территории) по сравнению с промышленными имеют гораздо большие пространственные масштабы влияния, менее управляемы и имеют ряд малоизученных аспектов. ЗА актуальна для многих стран мира, особенно для расположенных в зоне пустынь, в том числе и для Узбекистана, обширные территории которого заняты пустынями Кызылкум, Устюрт, Аралкум и частично Каракумами.

Чрезмерная запыленность атмосферы влияет на рост заболеваемости населения, региональную окружающую среду и климат, изменяя биогеохимические циклы, оказывая радиационное воздействие на атмосферу, подавляя активность циклонов и влияя на микрофизику облаков и гидрологический цикл (Rashki et.al.,2015). Сингх и др. (2008) выявили, что отложение пыли над Аравийским морем может влиять на цветение хлорофилла, влиять на фитопланктон и охлаждать поверхность океана (Rashki et.al.,2015).

Другие возможные негативные последствия пылевых бурь включают в себя: снижение видимости, влияющее на авиа- и автотранспорт; снижение количества солнечного света, достигающего поверхности Земли;

эффект теплового «покрывала»; «эффект Воейкова» с повышением температуры воздуха на 6-7°K; угнетение растительного покрова.

Болезни связанные с запыленностью атмосферы возникают при вдыхании частиц пыли вместе с микробами, тяжелыми металлами, пестицидами и другими загрязняющими веществами, содержащимися в почве (Vozlaker et al., 2013). Благодаря микро- и нано-размерам, частицы легко попадают в легкие и проникают в кровоток. Пылевые бури способствуют росту таких заболеваний, как астма, трахеит, пневмония, аллергический ринит и силикоз (Wu et al., 2021). Кроме этих хорошо известных заболеваний дыхательной системы (Middleton, 2020), минеральная пыль считается одним из наиболее важных факторов риска аллергии и менингита в Иране и в Западной Африке (Rashki et.al.,2015) кардиоваскулярных, психологических и когнитивных и нейродегенеративных заболеваний (Broomandi et al., 2023).

В настоящее время ЗА является самой большой проблемой здравоохранения стран Приаралья, поскольку пыль с осушенного дна Арала, содержащая токсичные сульфаты опасна вдвойне.

Большинство исследований по ЗА посвящено диагнозу концентрации пыли во время пылевых бурь (Hersbach et al., 2020), значение которых заключается в кратковременном, остром воздействии на окружающую среду. Но как известно, длительное воздействие загрязняющих веществ, пусть даже в гораздо меньших концентрациях, опаснее, так как чревато хроническим отравлением. А именно этот аспект в отношении ЗА пустынями наименее изучен. Что касается Нижне-амударьинского оазиса (НО), где проживает большинство населения Каракалпакстана, все население Хорезма (Узбекистан), Куняургенчской и Ташаузской областей Туркменистана (рис.1), то ЗА этого региона является вообще неисследованной (за исключением выноса солей с осушенного дна Аральского моря).



**Рис. 1. Нижне-амударьинский оазис в окружении пустынь.**

Исследования многолетней динамики природных процессов необходимы для выявления их устойчивых тенденций и зависимости от различных факторов. Результаты таких исследований практически востребованы при прогнозировании этих процессов и разработке соответствующих мер реагирования антропогенным воздействием на их факторы. Особо актуальны такие исследования для регионов с динамичной трансформацией природной среды, к каковым относится и Южное Приаралье – эпицентр Аральского кризиса.

Очевидно, такое исследование должно включать и изучение динамики как усиливающих ЗА, так и его ослабляющих факторов. Поскольку пыление пустынных поверхностей происходит преимущественно в теплом сезоне (апрель-октябрь) (Тлеумуратова и др., 2024), ЗА исследуется только для этого времени года. Таким образом, цель данной работы – статистическое моделирование многолетней динамики (1961-2020гг.) загрязнения атмосферы в Нижне-амударьинском оазисе вследствие ветрового выноса пыли с комплекса источников – пустынь Аралкум, Устюрт, Кызылкум и Каракумов в теплом сезоне (апрель-октябрь).

**Методы исследования.** Задача определения запыленности атмосферы в НО состоит в вычислении полей приземных (в слое жизнедеятельности человека – 0-2м) концентраций пыли. Для исследования многолетней динамики загрязнения атмосферы разработана статистическая модель многолетней динамики загрязнения атмосферы (МДЗА), как совокупность уравнений регрессии, служащих эмпирическими генерализациями (обобщениями) динамики факторов ЗА и их влияния на динамику концентрации пыли. В данном исследовании факторами являются ветровой режим, количество осадков, растительный покров (РП) и площади пустынных поверхностей.

Динамичность экологических процессов, обусловленная Аральским кризисом, требует квантования периода моделирования. Период моделирования – 1961-2020гг. – разделен на десятилетия (1961-1970, 1971-1980 и т.д.), так как это время существенных природных трансформаций, а также это традиционное в эколого-географических исследованиях разделение времени эволюции Аральского кризиса (Тлеумуратова, 2018; Кубланов, 2023). Кроме того, такое квантование периода моделирования позволяет нивелировать существенные межгодовые изменчивости экологических условий, обусловленные внешними геофизическими

факторами (засушливые, маловодные годы, смена циркуляционных эпох и т.п.). Десятилетия нумеруются по хронологии:  $N=1$  для 1961-1970гг.,  $N=2$  для 1971-1980гг. и т.д.

Рассмотрим структуру построенной модели МДЗА. Первый блок статистической модели МДЗА состоит из регрессионных уравнений многолетней динамики факторов пылевыноса с каждого из 4 источников (Аралкум, Устюрт, Кызылкум, Каракумы).

Второй блок МДЗА представлен уравнениями выноса пыли при отсутствии проективного покрытия и осадков. Вынос  $V_0$  пустынного аэрозоля с единицы площади конкретного источника  $p(p=\overline{1,4})$  за конкретный период времени  $\Delta t$ , в течение которого дует ветер с определенной скоростью  $u$ . Среднесезонный вынос пыли со всей площади  $p$ -го источника выноса равен:

$$V_0 = F \Delta t S_p \quad (1)$$

где  $F$  – мощность источника,  $S_p$  – площадь источника.

Для определения мощности источника  $F$  (поток примеси с единицы площади в единицу времени, мкг/м<sup>2</sup>с) в работах (Тлеумуратова, 2004, 2018; Кубланов, 2023) используется формула (Lu, Shao, 2001):

$$F = \frac{0,12 C_H g \rho_s}{p} Q, Q = \frac{c \rho u_c^3}{g} \left[ 1 - \left( \frac{u_{i,кр}}{u_i} \right)^2 \right] \quad (2)$$

где  $Q$  – расход примеси,  $\rho$  – плотность воздуха,  $\rho_s$  – плотность частиц,  $p$  – давление деформации, оказываемое поверхностью почвы на движущиеся по ней частицы аэрозоля,  $g$  – гравитационная постоянная,  $u_i$  – скорость трения,  $c = 0,25 + 0,33 \frac{w_g}{u_i}$  – коэффициент Оуэна (Owen, 1964),  $d$  – диаметр частиц,  $u_{i,кр}$  – критическая скорость трения (Кондратьев, Григорьев, 2000),  $C_H$  – наземная концентрация аэрозоля, определяемая по солесодержанию поверхностных слоев почвы (Тлеумуратова, 2004).

Третий блок модели содержит уравнения для вычисления влияния РП и осадков на значения приземной концентрации пыли  $C(x, y)$ .

Воздействие РП определяется уменьшением мощности источника пыли  $\Delta F$ , обусловленным уменьшением скорости ветра в растительном слое (Тлеумуратова, 2004, 2018; Кубланов, 2023). Для вычисления степени ослабления ветра растительным покровом применяется формула (Быкова, Дубов, 1974):

$$u_r = 0,83 \delta_f c_{Hh}^{0,5} u_a + (1 - \delta_f) u_a \quad (3)$$

здесь  $u_a$  – фонная скорость ветра,  $c_{Hh}$  – коэффициент теплообмена на верхней границе слоя растительности,  $\delta_f$  – общее проективное покрытие (ОПП).

Вычислив  $\Delta F = F(u_a) - F(u_r)$  с использованием формулы (3) получим величину уменьшения мощности пылеиспускания подстилающей поверхности ( $\text{мкг}/\text{м}^2\text{с}$ ) (Тлеумуратова, 2004, 2018; Кубланов, 2023):

$$\Delta V_{p\Gamma}(N) = \Delta F(N) \Delta t(N) S_p(N) \quad (4)$$

Эффект ослабления выноса осадками вычисляется по формуле:

$$\Delta V_{oc} = V_0 f_{oc} \quad (5)$$

где  $f_{oc}$  – среднее за десятилетие повторяемость осадков в теплом сезоне.

В четвертом блоке модели МДЗА вычисляется среднесезонный вынос пыли с  $p$ -ой пустыни с учетом влияния РП и осадков:

$$V_p(N) = V_0(N) - \Delta V_{p\Gamma}(N) - \Delta V_{oc}(N) \quad (6)$$

В пятом блоке вычисляются усредненные по десятилетию  $N$  и по сезону поля концентрации пыли в зависимости от среднесезонного выноса пыли:

$$C_p(N) = 3,3k V_p(N) \exp(-0,015x - 0,6) \quad (7)$$

И наконец, последний блок модели МДЗА содержит уравнения для вычисления совокупного поля среднесезонной концентрации пыли в НО от всех источников по десятилетиям периода моделирования.

$$C(x, y, N) = \sum_{p=1}^4 C_p(x, y, N) \quad (8)$$

**Результаты исследования.** Статистический анализ фактических данных показал, что многолетняя динамика факторов может быть представлена следующими уравнениями регрессии (табл.1). В табл.1. площадь измеряется в тыс.кв.км, ОПП – в долях единицы, ветровой режим – в количестве дней за теплый сезон с ветром более 4м/с, количество осадков – в мм/год.

Таблица 1

Многолетняя динамика факторов

	Площадь	ОПП	Ветровой режим	Количество осадков
А	$S_p(N) = 10,809N - 1,0133$	$\delta_f(N) = -0,1214N + 0,8404$	$B(N) = 1,0633N + 41,468$	$R(N) = -1,6671N + 64,823$
У	$S_p(N) = 212$	$\delta_f(N) = -0,0954N + 0,784$	$B(N) = 0,5203N + 64,383$	$R(N) = -2,3264N + 71,215$
Кз	$S_p(N) = 0,0971N + 299,9$	$\delta_f(N) = -0,0226N + 0,3273$	$B(N) = 0,3096N + 22,209$	$R(N) = -1,0729N + 61,987$
Кр	$S_p(N) = 0,1049N + 349,9$	$\delta_f(N) = -0,0186N + 0,2643$	$B(N) = 1,4438N + 47,252$	$R(N) = -5,5429N + 52,417$

**Примечание:**  $N$  – номер десятилетия, А – Аралкум, У – Устюрт, Кз – Кызылкум, Кр – Каракумы.

Среднесезонный вынос пыли в десятилетия с учетом влияния РП и осадков аппроксимирован, как показано в табл.2.

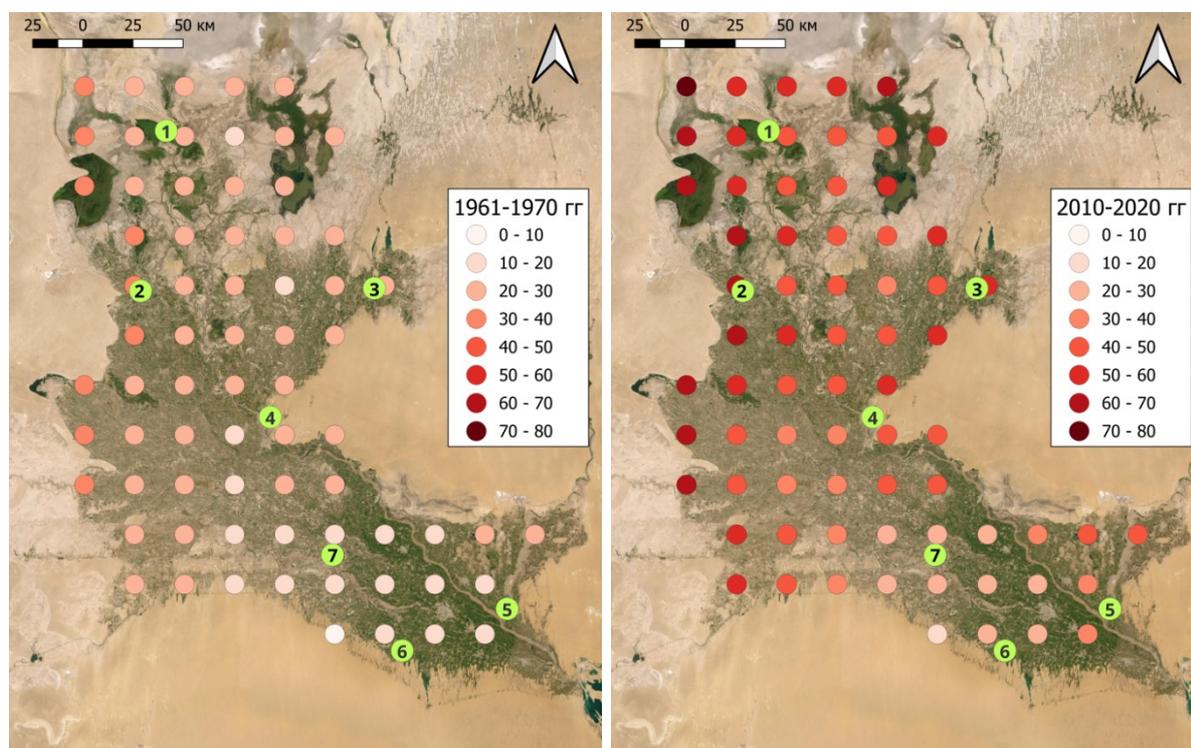
Таблица 2

Аппроксимации среднесезонного выноса пыли

	Аралкум	Устюрт	Кызылкум	Каракумы
$V_p(N)$	$V_p(N) = 2,7752 \cdot e^{0,7037N}$	$V_p(N) = 52,959 \cdot e^{0,0803N}$	$V_p(N) = 235,61 \cdot e^{0,0188N}$	$V_p(N) = 294,6 \cdot e^{0,0284N}$

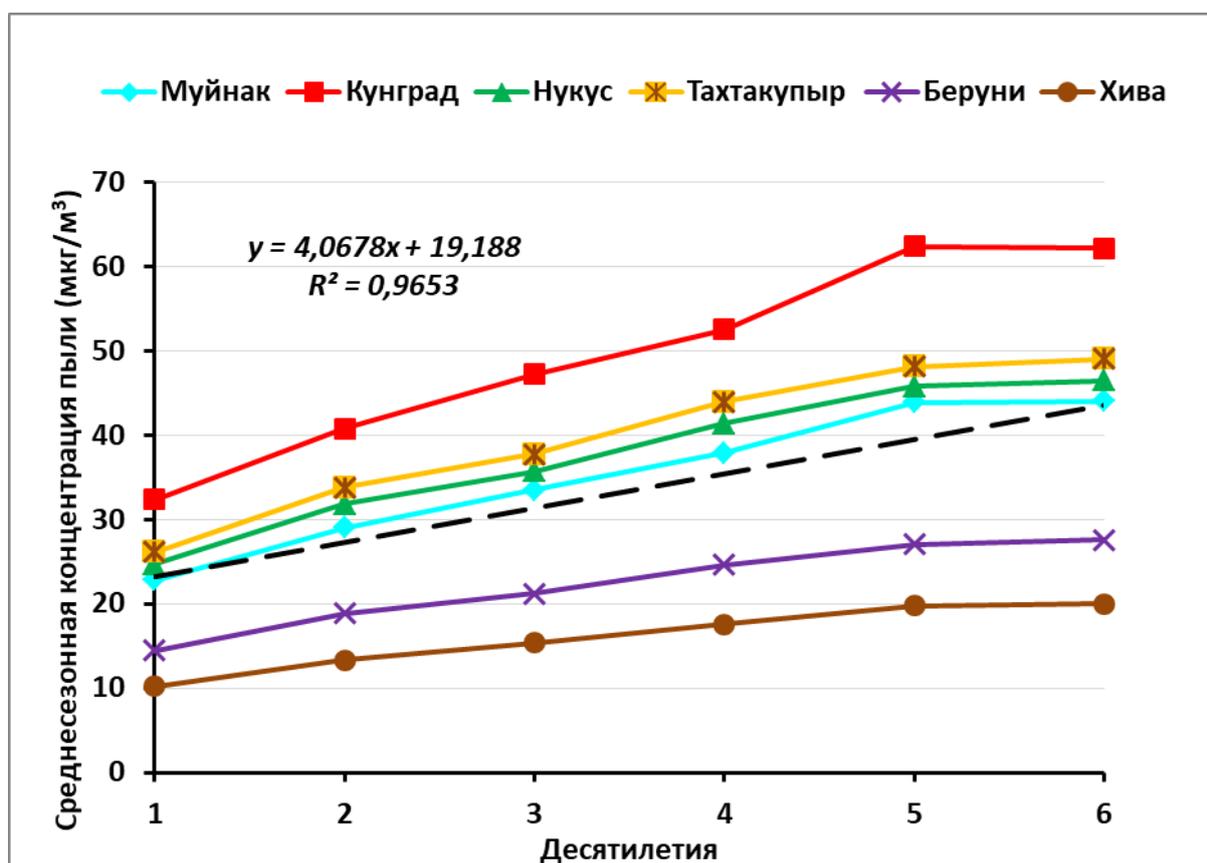
Результаты расчетов полей среднесезонной концентрации пыли на уровне 2м с использованием формулы (8) представлены на рис. 2. Для иллюстрации отобраны по контрасту результаты моделирования для 1 и 6

десятилетий периода моделирования. Из рисунка видно увеличение ЗА во всех точках расчетной области, особенно в северо-восточных и северо-западных районах НО.



**Рис. 2. Динамика среднемесячной концентрации ( $\text{мкг}/\text{м}^3$ ) пыли от всех источников (1-Муйнак, 2-Кунград, 3-Тахтакупыр, 4-Нукус, 5-Турткуль, 6-Хива, 7-Дашогуз).**

Более наглядно многолетняя динамика ЗА отображена на графике (рис.3). Среднесезонная концентрация пыли максимальна в Кунградском и Тахтакупырском районах. Заметим, что близость среднесезонной концентрации к ПДК означает значительность количества дней с превышением ПДК.



**Рис. 3. Динамика среднесезонной концентрация пыли и песка с комплекса пустынь в различных точках Нижне-амударьинского оазиса**

В среднем по региону (пунктирная линия на рис.3) многолетняя динамика выражается следующим уравнением:

$$C(x, y, N) = 4,0678 N + 19,188 \quad (9)$$

Верификация модели МДЗА проводилась сравнением модельных результатов с данными наземных измерений (полевые замеры счетчиком аэрозоля и городские замеры автоматическими регистраторами фирмы Comde-Derenda GmbH (Германия)). Погрешность статистической модели МДЗА, складывающаяся в основном из погрешности аппроксимации многолетней динамики факторов, не превышает 8%. При этом мы считали информацию по ветровому режиму и осадкам достоверной. Погрешность модели обусловлена главным образом нерепрезентативностью и пространственной, и временной, данных по ОПП пустынной растительности.

Дополнительный статистический анализ многолетней динамики количества пылевых бурь показал их периодическое уменьшение/увеличение. Некоррелированность с динамикой ЗА объясняется сравнительной редкостью пылевых бурь (не более 5-6 за сезон). Таким образом, доказываемость ошибочность вывода многих авторов, основанный на количестве пылевых бурь, что в частности вынос солей с осушенного дна Арала уменьшается. Одновременно доказываемость, что объем годового выноса пыли с пустынь должен определяться статистической повторяемостью всех случаев ветра со скоростью более 4 м/с.

В целом, темпы увеличения ЗА замедляются вследствие лимитированности ветроактивности, которая не может увеличиваться неограниченно. Также лимитировано увеличение площади Аралкума, обуславливавшие наибольшие темпы роста ЗА в 1-4 десятилетиях. Но, тем не менее ЗА прогрессирует из-за устойчивой тенденции РП и осадков к уменьшению вследствие потепления климата.

**Заключение.** Научная значимость данного исследования заключается в построении и реализации статистической модели ЗА на территориях, соседствующих с пустынями. Модель может быть применима например, в странах прилегающих к таким пустыням как Сахара, Гоби, Такламакан и др. Результаты данного исследования необходимы в медицинских исследованиях зависимости заболеваний от качества воздуха, климатических исследованиях вклада аэрозольного форсинга в региональные климатические изменения. Выявленные закономерности многолетней динамики исследуемых процессов служат подспорьем для построения различных моделей развития окружающей среды в условиях деградации РП.

Практическое значение работы состоит в возможности (и необходимости) использования результатов исследования при решении

таких задач охраны окружающей среды, как уменьшение рисков для здоровья населения и улучшение состояния РП в Южном Приаралье. Количественная оценка динамики запыленности воздуха и ее факторов, конкретизирует направленность, степень и объем мероприятий, предпринимаемых с целью улучшения экологической обстановки в Каракалпакстане и в целом по региону Южного Приаралья. Анализ возможных мер ослабления ЗА позволяет обоснованию предпочтения при планировании соответствующими организациями мероприятий по охране окружающей среды.

#### Список использованной литературы

1. Singh R. P. et al. Enhancement of oceanic parameters associated with dust storms using satellite data // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2008. – Т. 113. – №. C11, – С. 1-13.
2. Rashki A. et al. Dust-storm dynamics over Sistan region, Iran: Seasonality, transport characteristics and affected areas // *Aeolian Research*. – 2015. – Т. 16. – С. 35-48.
3. 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.
4. Wu Y. et al. Sand and dust storms in Asia: a call for global cooperation on climate change // *The Lancet Planetary Health*. – 2021. – Т. 5. – №. 6. – С. e329-e330.
5. Middleton N. Health in dust belt cities and beyond—an essay by Nick Middleton // *bmj*. – 2020. – Т. 371. – С. m3098.
6. Broomandi P. et al. A synoptic-and remote sensing-based analysis of a severe dust storm event over Central Asia // *Aerosol and Air Quality Research*. – 2023. – Т. 23. – №. 2. – С. 220309.

7. Hersbach H. et al. The ERA5 global reanalysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2020. – Т. 146. – №. 730. – С. 1999-2049.
8. Глеумуратова Б.С. и др. Тепловой эффект опустынивания в Южном Приаралье: коллективная монография / под ред. Б.С. Глеумуратовой // Нукус. – 2024. – 244с.
9. Глеумуратова Б.С. Математическое моделирование влияния трансформаций экосистемы Южного Приаралья на почвенно-климатические условия. Дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. – Ташкент, 2018. – 209 с.
10. Кубланов Ж.Ж. Количественная оценка солевого параметра динамики осушенного дна Аральского моря: Дисс..док.фил. (PhD). биол. наук.–Нукус, 2023.–109с.
11. Глеумуратова Б.С. Математическое моделирование переноса аэрозоля в нижних слоях атмосферы: Дисс..канд. физ.-мат. наук.–Ташкент, 2004.–138с.
12. Lu H., Shao Y. Toward quantitative prediction of dust storms: an integrated wind erosion modelling system and its applications // Environmental Modelling & Software. – 2001. – Т. 16. – №. 3. – С. 233-249.
13. Owen P. R. Saltation of uniform grains in air // Journal of Fluid Mechanics. – 1964. – Т. 20. – №. 2. – С. 225-242.
14. Кондратьев К.Я., Григорьев А.А. Природные и антропогенные экологические катастрофы: метеорологические бедствия и катастрофы //Исследование Земли из космоса. – 2000. – №. 4. – С. 3-19.
15. Быкова Д.П., Дубов А.С. Влияние лесных полос на распределение концентрации пыли при пыльных бурях // Метеорология и гидрология. – 1974. – №7. – С.23-36.