

УДК 551.51

**ПОВЫШЕНИЕ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА,  
КАК РЕЗУЛЬТАТ КОНВЕКТИВНОГО ВЫНОСА АЭРОЗОЛЯ  
НА ПУСТЫННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ**

**Б.С. ТЛЕУМУРАТОВА<sup>1\*</sup>, М.Л. АРУШАНОВ<sup>2</sup>, Б.Ж. НАРЫМБЕТОВ<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Каракалпакский научно-исследовательский институт естественных наук, tbibigul@mail.ru

<sup>2</sup> Научно-исследовательский гидрометеорологический институт, mikl-arushanov@rambler.ru

**Аннотация.** *Выполнена модификация математической модели влияния конвективного выноса аэрозоля (МКВ) с пустынных поверхностей на приповерхностную температуру воздуха, разработанную нами ранее для «идеальных» условий (отсутствия растительного покрова и наличия ветровых нагрузок – условие штилевой погоды).*

*В ходе полевых экспериментов по ратификации модели выявилось существенное влияние ветра и растительного покрова на тепловой эффект конвективного выноса аэрозоля (КВ), вызывающие значительные невязки модельных и экспериментальных данных. На основе выведенных эмпирических зависимостей теплового эффекта КВ от скорости ветра и общего проективного покрытия растительности, а также изменения некоторых параметров МКВ, разработана версия МКВ-2 с учётом реальных условий.*

*По результатам реализации МКВ-2 для территории Южного Приаралья в тёплый период года (май-октябрь) в пустынных зонах отмечается повышение температуры в приповерхностном слое, в среднем, на 3,5°C, как следствие конвективного выноса аэрозоля. Эта величина является весьма значительной, что указывает на необходимость учёта конвективного выноса аэрозоля в прогностических и климатических моделях приземной температуры воздуха на пустынных территориях.*

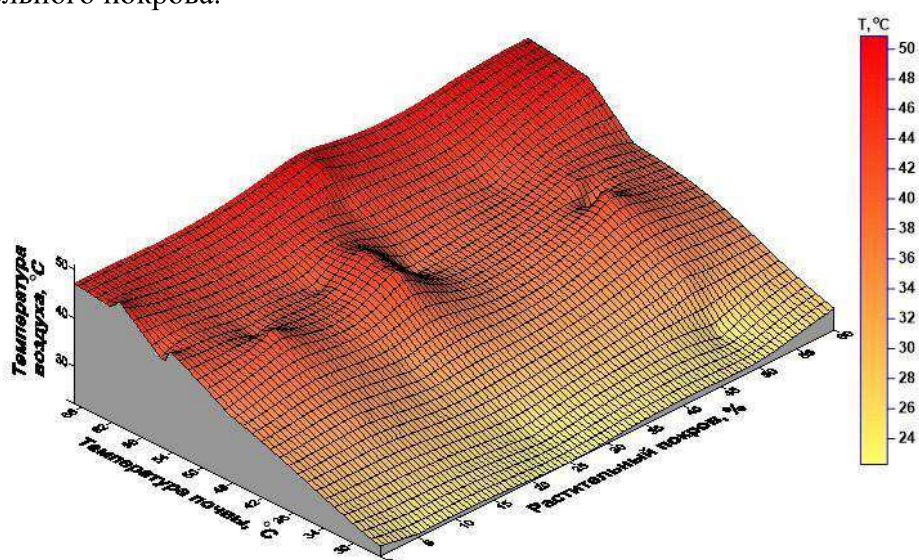
**Ключевые слова:** *конвективный вынос, аэрозоль, приповерхностная температура воздуха, Южное Приаралье.*

**Введение.** Главнейшим процессом, характеризующим состояние атмосферы, является теплообмен в системе почва-атмосфера. Особый характер этот процесс носит в пустынных территориях, где за счёт конвективного выноса аэрозоля с разогретой почвы в тёплый период года происходит дополнительный нагрев воздуха в приповерхностном слое атмосферы. В свою очередь, одним из основных факторов глобального изменения окружающей среды являются процессы, стимулирующие опустынивание. В этих процессах в аридных областях планеты, в частности, Южного Приаралья, важную составляющую представляет вынос частиц аэрозоля с подстилающей поверхности и последующий его атмосферный перенос. Вынос аэрозоля с разогретой коротковолновой радиацией пустынной подстилающей поверхности, наряду с пыльными бурями, является естественной составляющей климатической системы. Здесь необходимо отметить, что далеко непростой механизм этого явления по настоящее время изучен недостаточно.

Конвективный вынос аэрозоля с пустынных поверхностей как фактор повышения приземной температуры воздуха в Южном Приаралье рассмотрен нами впервые в работах [Tleumuratova, Narymbetov, 2022; Арушанов и др., 2022] для «идеальных» условий (отсутствие растительного покрова, штилевые условия). В дальнейшем, в ходе полевых экспериментов, выполненных с целью ратификации

\* Ответственный автор: tbibigul@mail.ru, тел. +998 91 384-64-08

модели, выявились существенные невязки для отдельных реализаций, связанные с реальными условиями атмосферы и подстилающей поверхности, а именно с ветровыми нагрузками и, как предполагалось, наличием растительного покрова. Однако, из проведённых измерений приповерхностной температуры воздуха в летний период года было выявлено наличие пустынной растительности, которая практически не коррелирует с температурой воздуха. Сказанное можно видеть на рис. 1, где представлена поверхность температуры воздуха ( $T_v$ ), как функция температуры почвы ( $T_n$ ) и процентного покрытия растительным покровом (РП) в точках плато Устюрт, Муйнак и Караузяк, где отчётливо проявляется очевидная линейная связь температуры воздуха и температуры почвы и отсутствия таковой для растительного покрова пустынных территорий (табл. 1). При этом необходимо иметь в виду, что косвенное влияние растительного покрова на приповерхностную температуру воздуха проявляется в уменьшение концентрации аэрозоля при его конвективном выносе с почвы пустынных территорий относительно участков, лишённых растительности, а сама зависимость отлична от линейной. Эта нелинейность определяется взаимным воздействием на конвективный вынос аэрозоля скорости ветра и растительным покровом пустынных территорий, что можно видеть на рис. 2, где представлена поверхность температуры воздуха, как функция скорости ветра и растительного покрова.



**Рис. 1. Поверхность приземной температуры воздуха, как функция температуры почвы и количества (%) растительного покрова**

**Fig 1. Surface air temperature as a function of soil temperature and amount (%) of vegetation cover**

Усыхание Аральского моря стало причиной существенных региональных климатических изменений [Вагер, Утина, 1982; Субботина, Чанышева, 2006; Тлеумуратова, 2018; Чуб и др., 1999], приведшее к повышенному аэрозольному загрязнению атмосферы, влияющему на радиационный режим [Alfaro, Gomes, 2001; Shao et al., 2020; Кондратьев, Ивлев, 1995].

Таблица 1

Корреляционная матрица приповерхностной температуры воздуха, температуры почвы и растительного покрова

Table 1

Correlation matrix of surface air temperature, soil and vegetation temperatures

Величины	Приземная температура воздуха, Тв	Температура почвы, Тп	Растительный покров, РП
Приземная температура воздуха, Тв	1,00	0,93	0,11
Температура почвы, Тп		1,00	0,04
Растительный покров, РП			1,00

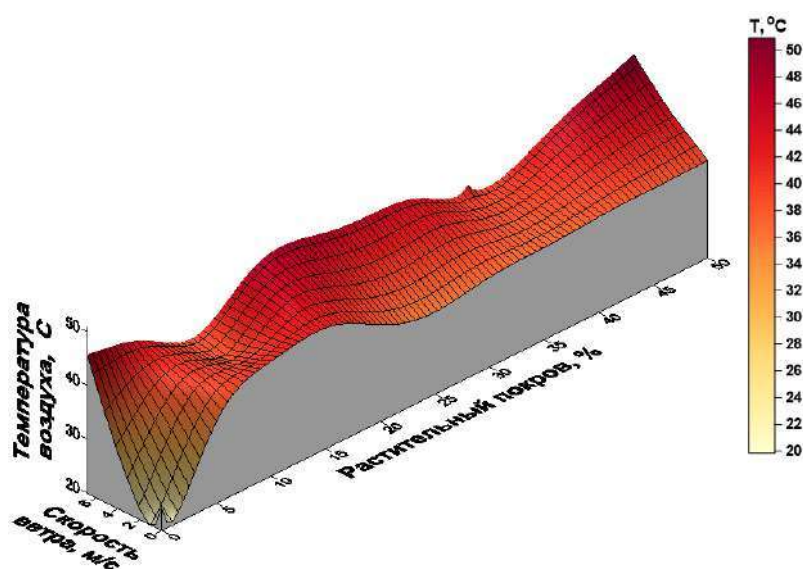


Рис. 2. Поверхность приземной температуры воздуха, как функция скорости ветра и количества (%) растительного покрова

Fig. 2. Surface air temperature as a function wind speed and amount (%) of vegetation cover

Во многих работах по аэрозольному загрязнению атмосферы в качестве основного источника рассматриваются пылевые бури [Akhlaj et al., 2012; Amgalan et al., 2017; Awadh, 2023; Shao et al., 2011; Shi et al., 2019; Sorek-Hamer et al., 2013]. Однако, существенным фактором повышения концентрации атмосферного аэрозоля на пустынной территории, такой как, например, Южное Приаралье, является конвективный вынос аэрозоля с образовавшейся пустынной поверхности (пустыня Аралкум) [Гранберг, 2009; Семенов и др., 2006]. Механизм влияния аэрозоля на климатические изменения в пограничном слое атмосферы достаточно хорошо изучен различными методами [Кондратьев, Ивлев, 1995; Тлеумуратова, 2018]. В данной же работе на основании анализа условий моделирования и проведения полевых экспериментов показана необходимость введения некоторых поправок к ранее разработанной модели (МКВ) с учетом влияния скорости ветра и растительного покрова, а также пересмотра некоторых параметров модели.

Таким образом, выполненные полевые измерения приповерхностной температуры с учётом ветровых нагрузок и растительного покрова, показали необходимость модификации МКВ влияния конвективного выноса (КВ) аэрозоля с пустынных поверхностей на приземную температуру воздуха.

**Методы исследования.** Математическая модель оценки вклада конвективной эмиссии аэрозоля в повышение приповерхностной температуры (МКВ) подробно описана в работе [Teumuratova, Narymbetov, 2022]. Здесь приводится краткое содержание модели с указанием и обоснованием проведенных коррекций.

МКВ состоит из двух блоков. В первом блоке вычисляется массовая концентрация аэрозоля, генерируемая конвективными токами. Для этого использовалось эмпирическое соотношение, теоретическое обоснование которого дано в работе [Гледзер и др., 2009]:

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

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

Сопоставление экспериментальных измерений и модельных расчетов показало, что формула (1), полученная для условия калмыцких пустынь (юг России), должна быть адаптирована к территории Южного Приаралья, которая была получена в виде:

$$\Delta\rho = 0,1866 \cdot \delta T^{0,535} \quad (1a)$$

Во втором блоке методом частиц «*Particle-In-Cell*» [Харлоу, 1967] вычисляется повышение температуры окружающего воздуха (в слое 0-3м) нагретыми взвешенными почвенными частицами [Teumuratova, Narymbetov, 2022]. По отклонению массовой концентрации аэрозоля, вычисленной в первом блоке модели, определяется счётная концентрация  $N$  и объем воздуха  $dV$ , занимаемый одной частицей. В МКВ предполагается, что объём  $dV$  инвариантен относительно размера частицы. Однако, при условии равномерного распределения полидисперсного аэрозоля по пространству можно принять, что занимаемый частицей объём  $dV$  пропорционален кубу ее радиуса.

**Полевые эксперименты.** Для валидации результатов моделирования в теплое время года 2021-2023 гг. была проведена серия полевых экспериментов в пустынных областях Южного Приаралья (Устюрт, Муйнак, Караузьяк, Нукусский район).

Эксперименты проводились в послеполуденные часы (14-15 ч.). Измерялись: температура воздуха на уровнях 0,2, 0,5, 1,5 и 2 м, температура поверхности почвы, счётная концентрация и дисперсность аэрозоля (прибор SorhisSX-L301T), скорость ветра с фиксацией с помощью GPS географических координат точек, где были выполнены измерения.

Фоновая температура воздуха и концентрация аэрозоля за те же даты измерялась на такыровидных, слегка смоченных, близлежащих участках. Для выявления и оценки влияния растительного покрова на исследуемый форсинг, эксперименты проводились для поверхностей с различным проективным покрытием растительности.

**Обсуждение невязок результатов моделирования и полевых экспериментов.** Численные эксперименты с моделью МКВ с различными вариантами функций распределения размеров частиц и веществ, а также толщины термического пограничного слоя выявили, что искомое изменение температуры  $\Delta T$  наиболее чувствительно к

вариациям дисперсности. На рис. 3, отображающем результаты расчетов для монодисперсного аэрозоля, видно, что максимальные значения  $\Delta T$  соответствуют субмикронным размерам частиц.

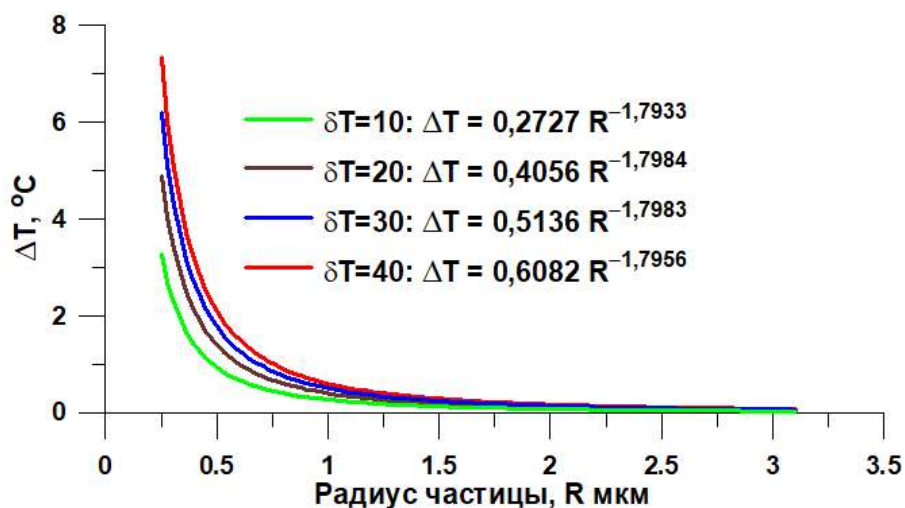


Рис. 3. Зависимость  $\Delta T$  от радиуса частиц  $R$  монодисперсного аэрозоля и толщины термического пограничного слоя  $\delta T$  (июнь)

Fig. 3. Dependence of  $\Delta T$  from the radius  $R$  of monodisperse aerosol particles and the thickness of the thermal boundary layer  $\delta T$  (June)

Надо отметить существенную нелинейность указанной зависимости:  $\Delta T$  резко возрастает для частиц, радиус которых меньше 0,5 мкм. В этом же диапазоне проявляется значимость толщины термического пограничного слоя  $\delta T$ : значения  $\Delta T$  падают от 10°C до 0,8°C. Различия, обусловленные  $\delta T$  и размерами, нивелируются для частиц, радиус которых больше 1 мкм.

Очевидно, что изменения температуры  $\Delta T$  слоя воздуха, прилегающего к подстилающей поверхности, должны существенно зависеть от функции распределения размеров частиц. Расчеты по МКВ, изложенные в работе [Tleumuratova, Narymbetov, 2022], проводились по функции распределения, определенной для условий пустынь Таджикистана [Горчаков, Шукуров, 2003]. С использованием счетчика аэрозоля (разрешение 0,3 мкм) в качестве входных данных взяты показания прибора и экстраполированные значения для диапазона 0,1-0,3 мкм.

Отметим, что измерения счетной концентрации и дисперсности аэрозоля показали преобладание частиц с размерами 0,3-0,5 мкм, дающих максимальный тепловой эффект. Преобладание диапазона 0,3-0,5 мкм (78%) характерно для всех пунктов наблюдения. Вариация функции распределения в зависимости от координат и времени года оказалась незначительной в пределах Южного Приаралья.

Введение поправок 1-3 уменьшило среднюю невязку экспериментальных и модельных данных с 1,8К до 1,1К, но различия оставались для отдельных реализаций значительными (табл. 2). Частично они объясняются погрешностью измерений, связанной с пульсационным характером ветра (порывистость) и конвекции (отрыв отдельных термиков).

Таблица 2

Невязки модельных ( $\Delta T_{\text{мод}}$ ) и экспериментальных ( $\Delta T_{\text{эксп}}$ ) данных

Table 2

Residuals of model ( $\Delta T_{\text{mod}}$ ) and experimental ( $\Delta T_{\text{exp}}$ ) data

Область измерений	РП	V, м/с	T <sub>п</sub> , °C	T <sub>в</sub> , °C	T <sub>ф</sub> , °C	$\Delta T_{\text{мод}}$	$\Delta T_{\text{эксп}}$	$\Delta T_d$
Плато Устюрт 11.10.2022	0%	0	31,5	24	22	2,15	2	0,15
Плато Устюрт 10.07.2023	30%	4,6	55,1	42,5	41,1	4,55	1,4	3,15
Плато Устюрт 31.05.2023	5%	2,2	51,9	38,8	34,9	2,94	3,9	-0,96
Нукус 31.05.2023	15%	3,0	59	44,4	37,5	3,9	6,9	-3,0
Нукус 31.05.2023	45%	2,6	59,8	41,3	36,3	3,88	5	-1,12
Нукус 03.07.2023	10%	4,3	48,5	38,2	37,1	2,72	1,1	1,62
Нукус 03.07.2023	35%	6,8	51,6	41,9	37,1	7,9	4,8	3,1
Нукус 03.07.2023	50%	2,9	53	42,7	37,1	3,85	5,6	-1,75

**Примечание:** РП – общее проективное покрытие растительного покрова, V – скорость ветра, T<sub>п</sub> – температура поверхности почвы; T<sub>в</sub> – температура воздуха; T<sub>ф</sub> – фоновая температура;  $\Delta T_d = \Delta T_{\text{мод}} - \Delta T_{\text{эксп}}$  – невязки.

**Note:** RP is the total projective vegetation cover, V is the wind speed, T<sub>n</sub> is the temperature of the soil surface; T<sub>a</sub> – air temperature; T<sub>b</sub> is the background temperature;  $\Delta T_d = \Delta T_{\text{mod}} - \Delta T_{\text{exp}}$  – residuals.

Как видно из таблицы, отражающей результаты натурных экспериментов, при различных скоростях ветра и РП, наименьшая невязка соответствует отсутствию ветра и РП. Отрицательная  $\Delta T_d$  (усиление теплового эффекта) наблюдалась только для случаев слабого ветра (1-3 м/с), поставляющего дополнительно порцию нагретого мелкодисперсного аэрозоля (ветровой вынос аэрозоля). Усиление ветра (со скоростями больше 3 м/с), когда фракция крупнодисперсного аэрозоля резко увеличивается, приводит к обратному эффекту.

Для количественной оценки влияния ветра на тепловой эффект КВ модель дополнена модулем «А»: для вычисления дополнительной концентрации аэрозоля, поступающей в атмосферу при порывах ветра, используется формула мощности источника [Lu, Shao, 2001]:

$$F = \frac{0,12 C_H g \rho_s}{\rho} Q,$$

$$Q = \begin{cases} \frac{c \rho u_*^3}{g} \left[ 1 - \left[ \frac{u_*^{KP}(d)}{u_*} \right]^2 \right] & u_* \geq u_*^{KP} \\ 0 & u_* < u_*^{KP} \end{cases} \quad (2)$$

где F – мощность источника (кг/м<sup>2</sup>с), Q – расход примеси (кг·м), ρ – плотность воздуха (кг/м<sup>3</sup>), ρ<sub>s</sub> – плотность частиц (кг/м<sup>3</sup>), p – давление деформации, оказываемое поверхностью почвы на движущиеся по ней частицы аэрозоля (гПа), g – гравитационная

постоянная ( $\text{м}^3/\text{кг}\cdot\text{с}^2$ ),  $u_*$  – скорость трения ( $\text{м}/\text{с}$ ),  $c=0,25+0,33w_g(d)/u_*$  – коэффициент Оуэна [Owen, 1964],  $w_g(d)$  скорость частицы ( $\text{м}/\text{с}$ ), как функция её диаметра  $d$ ,  $u_*^{kp}(d)$  – критическая скорость трения ( $\text{м}/\text{с}$ ),  $C_n$  – наземная концентрация аэрозоля ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ) [Тлеумуратова, 2004].

В результате получены зависимости дополнительной массовой концентрации аэрозоля  $\Delta C$  и изменений теплового эффекта КВ от скорости ветра (рис. 4, 5). Уравнения трендов  $\Delta C$ , выражающие эти зависимости, в совокупности с формулой (2), составляют дополнительный модуль «А» к модели МКВ.

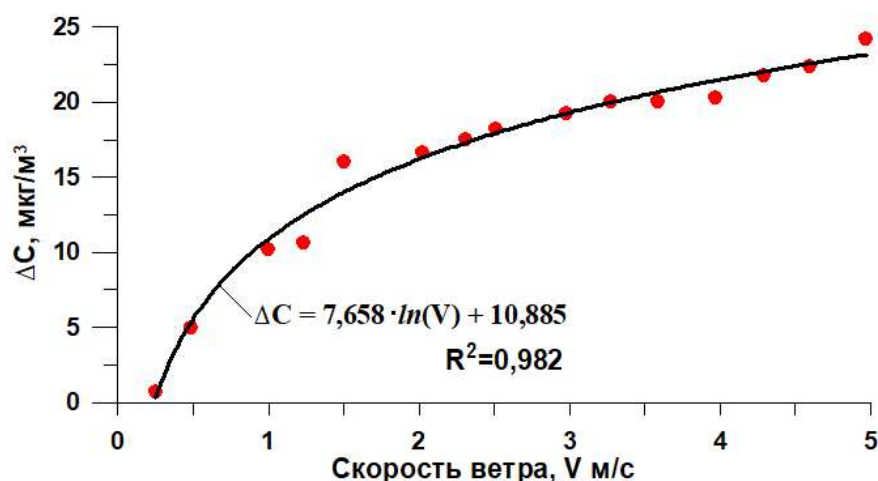


Рис. 4. Зависимость дополнительной массовой концентрации аэрозоля  $\Delta C$  от скорости ветра

Fig. 5. Dependence of additional mass concentration aerosol  $\Delta C$  from wind speed

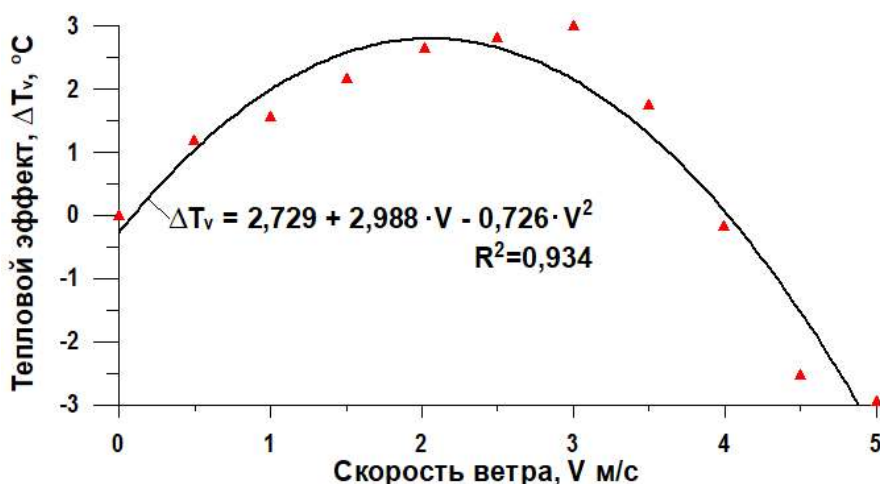


Рис. 5. Зависимость изменения теплового эффекта КВ от скорости ветра

Fig. 5. Dependence of the change in the thermal effect of CR from the wind speed

С учетом влияния скорости ветра тепловой эффект при КВ изменяется согласно уравнению на рис. 5.

Отепляющий эффект конвективного выноса аэрозоля, как выяснилось в ходе натуральных экспериментов существенно зависит и от растительного покрова. Известно, что растительный покров значительно влияет на тепло- и влагообмен, а при конвективном выносе аэрозоля и на массообмен на границе подстилающая поверхность-приземный слой, уменьшая, как было отмечено выше, количество выносимого с почвы аэрозоля. Уменьшение зависит от общего проективного покрытия и транспирации растительности. Влияние растительного покрова выражается преимущественно в том, что листовая поверхность задерживает конвективный поток аэрозоля, в результате часть нагретых микрочастиц остается в растительном слое (РС). Поэтому температура воздуха на верхней границе РС оказывается ниже, чем над голой поверхностью. В то же время накопление задержанных нагретых микрочастиц в РС обуславливает превышение температуры воздуха (ТВ) в РС по сравнению с окружающей голой поверхностью. Этот вывод подтверждается результатами измерений ТВ в РС. Механизм влияния транспирации растений заключается в следующем. Увеличение влажности воздуха замедляет конвекцию путем конденсации влаги на микрочастицах, увеличивая массу микрочастиц, кроме того, как известно, эвапотранспирация сама по себе уменьшает температуру воздуха. Поскольку влияние транспирации растений на конвективный поток аэрозоля требует отдельного изучения, мы ограничились эмпирическим уравнением уменьшения конвективного потока аэрозоля, как функции РП, полученным как аппроксимация логарифмической кривой экспериментальных данных (рис. 6).

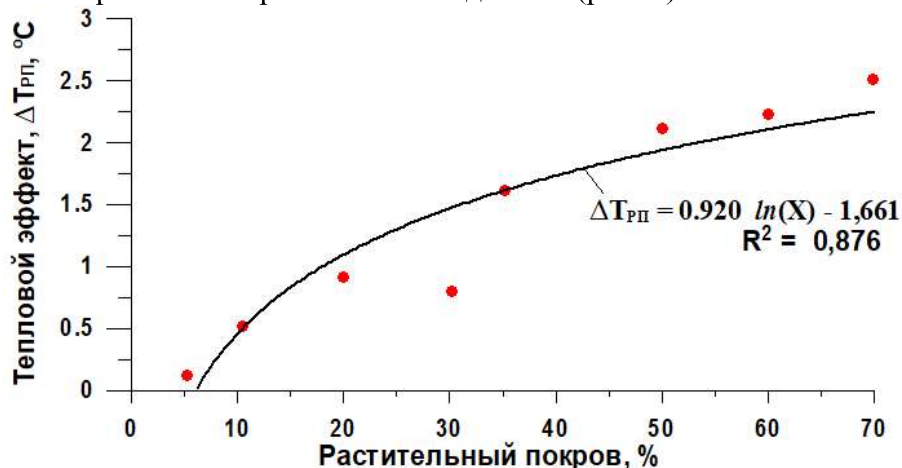


Рис. 6. Зависимость теплового эффекта  $\Delta T_{RP}$ , вызванного конвективным выносом аэрозоля, от величины (%) растительного покрова

Fig. 6. The dependence of the thermal effect  $\Delta T_{RP}$  caused by convective aerosol removal, on the value (%) of vegetation cover

Растительный покров уменьшает тепловой эффект КВ, согласно уравнению, приведенному на рис. 6.

Таким образом, выполненная модификация модели МКВ позволяет рассчитать тепловой эффект КВ не только для идеальных условий полного штиля и отсутствия растительного покрова ( $\Delta T$ ), но и для реальных условий ( $\Delta T_p$ ) наличия растительности и порывов ветра до 5 м/с:

$$\Delta T_p = \Delta T + \Delta T_v - \Delta T_{RP} \quad (3)$$

**Заключение.** Проведенное исследование показало значимость конвективного выноса аэрозоля с пустынных поверхностей в реальных условиях, как форсинга приповерхностной температуры воздуха в летние месяцы. В среднем по Южному Приаралью в тёплый сезон года (май-октябрь) в пустынных зонах конвективный вынос аэрозоля обуславливает повышение температуры воздуха на  $3,5^{\circ}\text{C}$ .

Обратная положительная связь, существующая между потеплением и рассматриваемым форсингом, лишь усиливает его. Необходимо отметить, что повышенная при дневной эмиссии концентрация аэрозоля сдерживает из-за поглощающих свойств почвенного аэрозоля ночное излучение, что также усиливает отепляющий эффект.

Растительный покров значительно снижает отепляющий эффект конвективного выноса аэрозоля в нелинейной зависимости от проективного покрытия. Это усиливает важное значение фитомелиорации как меры против опустынивания и ослабления потепления климата.

Численные и полевые эксперименты выявили высокую чувствительность модели конвективного выноса к дисперсности аэрозоля, условиям подстилающей поверхности и скорости ветра. Таким образом выяснилось, что тепловой эффект конвективного подъема пустынного аэрозоля представляет собой особо тонкий механизм взаимодействий подстилающей поверхности и атмосферы.

Для оценки региональных и глобальных климатических изменений с учетом влияния пустынных зон как «островов тепла» необходимы дальнейшие исследования с учетом скорости конвекции, турбулентной диффузии, нелинейных эффектов, вертикальных градиентов и теплообмена пустынных участков с соседними качественно отличающимися ландшафтами, влияния растительного покрова, статистики ветрового режима исследуемой местности. Очевидна необходимость применения в таких исследованиях методов математического моделирования, системного анализа и данных дистанционного зондирования.

Проведенные полевые эксперименты позволили снизить невязки модельных и экспериментальных данных с  $1,8^{\circ}\text{C}$  до  $0,3^{\circ}\text{C}$ . Точность экспериментальных данных и их информативность, учитывая пульсационный характер ветра (порывистость) и конвекции (отрыв отдельных термиков), возможно значительно повысилась на основе использования приборов с непрерывной регистрацией метеорологических величин.

Модифицированная модель вклада в климатические изменения глобальной температуры за счёт конвективного выноса аэрозоля с учётом планетарной тенденции опустынивания может быть применена к другим пустынным территориям планеты с её предварительной адаптацией.

Исследование выполнено при поддержке Министерства высшего образования, науки и инновационного развития Республики Узбекистан (грант АЛ-392103042 «Моделирование эколого-метеорологических процессов в зонах опустынивания Южного Приаралья, приводящих к потеплению регионального климата»). Все экспедиционные выезды финансировались и поддерживались Гидрометеорологическом центром Республики Каракалпакстан и Комитетом по экологии и охране окружающей среды Республики Каракалпакстан согласно заключенным договорам 51/52-2022 от 27.07.2022 г. и 2/2022 от 27.07.2022 г. со сторонними организациями, предусмотренными в указанном проекте.

**Вклад авторов:** **Б.С. Тлеумуратова:** постановка задачи, разработка модели, анализ результатов. **М.Л. Арушанов:** научная редакция работы, консультации по элементам модели и анализу результатов. **Б.Ж. Нарымбетов:** выполнение полевых

экспериментов, численные расчёты. Все авторы прочитали и согласны с подготовленной к публикации версией рукописи.

## ЛИТЕРАТУРА

- Арушанов М.Л., Глемуратова Б.С., Нарымбетов Б.Ж.* Аэрозольный форсинг приповерхностной температуры // *Гидрометеорология и мониторинг окружающей среды*, №1. – 2022. – С. 23-33.
- Вагер Б.Г., Утина З.М.* Моделирование влияния Аральского моря на процессы влагопереноса в пограничном слое атмосферы // *Тр. ГГО*, вып. 468. – 1982. – С. 56 – 65.
- Варгафтик Н.Б.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей // – М.: Наука. – 1972. – 720 с.
- Гледзер Е.Б., Гранберг И.Г., Чхетиани О.Г.* Конвективные потоки аэрозоля вблизи поверхности почвы // *Доклады РАН*, т. 426, №3. – 2009 – С. 380-385.
- Горчаков Г.И., Шукуров К.А.* Флуктуации концентрации субмикронного аэрозоля в конвективных условиях // *Известия РАН, Физика Атмосферы и океана*, т. 39, №1. – 2003. – С. 85-97.
- Гранберг И.Г.* Физические механизмы и экологические проблемы загрязнения атмосферного пограничного слоя над неоднородными поверхностями. Дисс. на соиск. учен. степ. д.ф.-м.н. – М.: 2009. – 339 с.
- Золотокрылин А.Н.* Климатическое опустынивание. – М.: Наука, 2003. – 246 с.
- Кондратьев К.Я., Ивлев Л.С.* О воздействии антропогенного аэрозоля на климат // *Доклады РАН*, т. 340. №1. – 1995. – С. 98-100.
- 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.
- Семенов О.Е., Щапов А.П., Галаева О.С., Идрисова В.П.* Ветровой вынос и песчано-солевые выпадения с осушенной части дна Аральского моря / *Аридные экосистемы*. – 2006. – том 12. – № 29. – С. 42-47.
- Субботина О.И., Чанышева С.Г.* Климат Приаралья. – Ташкент: НИГМИ, 2006. – 170 с.
- Глемуратова Б.С.* Математическое моделирование влияния трансформаций экосистемы Южного Приаралья на почвенно-климатические условия. Дисс. на соиск. учен. степ. д.ф.-м.н. (DSc). – Ташкент: 2018. – 210 с.
- Глемуратова Б.С.* Математическое моделирование переноса аэрозоля в нижних слоях атмосферы. Дисс. на соиск. учен. степ. к.ф.-м.н. – Ташкент: 2004. – 138 с.
- Федоров В.Д., Гильманов Т.Г.* Экология. – М.: Изд-во МГУ, 1980, – 464 с.
- Харлоу Ф.Х.* Численный метод частиц в ячейках для задач гидродинамики // *Вычислительные методы в гидродинамике*. – М.: Мир, 1967. – 460 с.
- Чуб В.Е., Чанышева С.Г., Никулина С.П., Спекторман Т.Ю., Субботина О.И.* Разработка региональных климатических сценариев. Информация об исполнении Узбекистаном своих обязательств по Конвенции ООН об изменении климата // *Бюллетень №1*. – Ташкент: САНИГМИ, 1999. – С. 5-14.
- 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*, вып. 29, №23(142). – 2012. – С. 86-92.
- Яламов Ю.И., Поддоскин А.Б., Юшканов А.А.* О граничных условиях при обтекании неоднородно нагретым газом сферической поверхности малой кривизны // *ДАН СССР*, 254. – 1980. – С. 343-346.
- Akhlaq M., Sheltami T.R., Mouftah H.T.* A review of techniques and technologies for sand and dust storm detection // *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, T. 11. – 2012. – PP. 305-322.

Alfaro S.C., Gomes L. Modeling Mineral Aerosol Production by Wind Erosion: Emission Intensities and Aerosol Size Distributions in Source Areas // J. Geophys. Res., V.106. – 2001. – PP. 18075-18089.

Angalan G., Liu G.R., Kuo T.H., Tang-Huang, L. Correlation between dust events in Mongolia and surface wind and precipitation // Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, v. 28, No 1 – 2017. – PP. 23-32.

Awadh S.M. Impact of North African Sand and Dust Storms on the Middle East Using Iraq as an Example: Causes, Sources, and Mitigation // Atmosphere, 14(1). – 2023. – PP. 3-24.

Lu H., Shao Y. Toward quantitative prediction of dust storms: an integrated wind erosion modelling system and its applications // Env. Modeling & Software, No 16. – 2001. – PP. 233–249.

Owen R.P. Saltation of uniform grains in air // J. Fluid Mech., No 20. – 1964. – PP. 225–242.

Shao Y. et al. Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science // Aeolian Research, Vol. 2, No. 4. – 2011 – P. 181-204.

Shao Y., Raupach R., Findlater P. The Effect of Saltation and Bombardment on the Entrainment of Dust by Wind // J. Geophys. Res., Vol. 98. – 1993. – PP. 12719-12726.

Shi L., Zhang J., Yao F., Zhang D., Guo H. (2020). Temporal variation of dust emissions in dust sources over Central Asia in recent decades and the climate linkages // Atmospheric Environment, Vol. 222. – 2019. – PP. 117-127.

Sorek-Hamer M. et al. Classification of dust days by satellite remotely sensed aerosol products // International journal of remote sensing. Vol. 34, No 8. – 2013. – PP. 2672-2688.

Tleumuratova B.S., Narymbetov B. Zh. Convective Aerosol Transport in Desert Zones as a Factor of Increasing Air Temperature // Arid ecosystems, Vol. 28, No. 1(90). – 2022 – PP. 11-19.

## ЧЎЛ ХУДУДЛАРИДА АЭРОЗОЛНИНГ КОНВЕКТИВ КЎЧИШИ НАТИЖАСИДА СИРТ ЯҚИНИ ҚАТЛАМИДА ҲАВО ҲАРОРАТИНИНГ ОРТИШИ

Б.С. ТЛЕУМУРАТОВА<sup>1</sup>, М.Л. АРУШАНОВ<sup>2</sup>, Б.Ж. НАРЫМБЕТОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Қорақалпоғистон Табиий фанлар илмий-тадқиқот институти, tbibigul@mail.ru

<sup>2</sup> Гидрометеорология илмий-тадқиқот институти, mikl-arushanov@rambler.ru

**Аннотация.** Чўл сиртларидан аэрозол конвектив кўчишининг сирт яқини қатламида ҳаво ҳароратига таъсири математик модели (ККМ)нинг модификацияси бажарилган. Бу модел биз томондан илгари "идеал" шароитлар (ўсимлик қопламанинг йўқлиги ва шамол юкламаларининг мавжуд эмаслиги – сокин об-ҳаво) учун ишлаб чиқилган.

Моделни текшириши бўйича дала тажрибалари жараёнида модел ва тажриба маълумотлари ўртасида сезиларли тафовутларни келтириб чиқарувчи шамол ва ўсимлик қопламанинг аэрозол конвектив кўчиши (КК)нинг термал эффектига сезиларли таъсири мавжудлиги аниқланди. КК иссиқлик таъсирининг шамол тезлиги ва ўсимликларнинг умумий проектив қопламига, шунингдек, ККМ баъзи параметрларининг ўзгариши бўйича олинган эмпирик боғлиқликларга асосланиб, реал шароитларни ҳисобга олган ҳолда ККМ-2 версияси ишлаб чиқилди.

Жанубий Оролбўйи ҳудуди учун ККМ-2 ни амалга ошириши натижаларига кўра йилнинг илиқ даврида (май-октябр) чўл зоналарида ер сиртига яқин қатламда ҳаво ҳароратининг ўртача КК натижасида 3,5°C га кўтарилиши қайд этилади. Бу кўрсаткич жуда муҳим бўлиб, чўл ҳудудларида сирт яқини қатлами ҳаво ҳароратининг прогностик ва иқлимий моделларида аэрозолнинг конвектив кўчишини ҳисобга олиши зарурлигини кўрсатади.

**Калит сўзлар:** конвектив кўчиши, аэрозол, сирт яқини қатлами ҳаво ҳарорати, Жанубий Оролбўйи.

**INCREASE IN THE SURFACE AIR TEMPERATURE AS A RESULT OF THE CONVECTIVE RELEASE OF AEROSOL TO DESERT TERRITORIES****B.S. TLEUMURATOV<sup>1</sup>, M.L. ARUSHANOV<sup>2</sup>, B.J. NARYMBETOV<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Karakalpak Research Institute of Natural Sciences, tbibigul@mail.ru<sup>2</sup>Hydrometeorological Research Institute, mikl-arushanov@rambler.ru

**Abstract.** *A modification of the mathematical model of the influence of the convective aerosol removal (MCR) from desert surfaces on the surface air temperature, which we previously developed for “ideal” conditions (the absence of vegetation cover and the presence of wind loads – the condition of calm weather) has been modified.*

*In the course of field experiments on model validation, a significant effect of wind and vegetation cover on the thermal effect of convective aerosol removal (CR) was revealed, causing significant discrepancies between model and experimental data. Based on the derived empirical dependences of the thermal effect of CR on wind speed and the total projective cover of vegetation, as well as changes in some parameters of the MCR, a version of MCR-2 was developed taking into account real conditions.*

*According to the results of the implementation of MCR-2 for the territory of the Southern Aral Sea in the warm period of the year (May-October), in desert zones, an increase in temperature in the near-surface layer by an average of 3.5°C is noted, as a result of convective aerosol removal. This value is very significant, which indicates the need to take into account the convective removal of aerosol in prognostic and climatic models of surface air temperature in desert areas.*

**Keywords:** *convective removal, aerosol, surface air temperature, South Prearalie.*

**REFERENCE**

*Arushanov M.L., Tleumuratova B.S., Narimbetov B.J. Aerosolnyy forsing pripoverhnostnoy temperaturi [Aerosol forcing of surface temperature] // Gidrometeorologiya i monitoring okrujayushey sredy, №1. – 2022. – S. 23-33. (in Russian)*

*Vager B.G., Utkina Z.M. Modelirovanie vliyaniya Aralskogo morya na processi vlagoperenosa v pogranichnom sloe atmosfery [Modeling the influence of the Aral Sea on the processes of moisture transfer in the boundary layer of the atmosphere] // Tr. GGO, vip. 468. – 1982. – S. 56 – 65. (in Russian)*

*Vargaftik N.B. Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i jidkostey [Handbook of thermophysical properties of gases and liquids]. – M.: Nauka. – 1972. – 720 s. (in Russian)*

*Gledzer E.B., Grandberg I.G., Chehetuani O.G. Konvektivnie potoki aerolya vblizi poverhnosti pochvi [Convective aerosol flows near the soil surface] // Doklady RAN, t. 426, №3. – 2009. – S. 380-385. (in Russian)*

*Gorchakov G.I. Shukurov K.A. Fluktuatsii konsratsii submikronnogo aerolya v konvektivnih usloviyah [Fluctuations in Submicron Aerosol Concentration under Convective Conditions] // Izvestiy RAN, Fizika Atmosfery i okeana, t. 39, №1. – 2003. – S. 85-97. (in Russian)*

*Grandberg I.G. Fizicheskie mehanizmi i ekologicheskie problemi zagryazneniya atmosfernogo pogranichnogo sloya nad neodnorodnimi poverhnostyami [Physical Mechanisms and Ecological Problems of Pollution of the Atmospheric Boundary Layer over Inhomogeneous Surfaces] / Diss. na soisk. uchyon. step. d.f.-m.n. – M.: 2009. – 339 s. (in Russian)*

*Zolotokrylin A.N. Klimaticheskoe opustinivanie [Climatic desertification]. – M.: Nauka, 2003. – 246 s. (in Russian)*

*Kondratev K.Y., Ivlev L.S. O vozdeystvii antropogennogo aerolya na klimat [On the impact of anthropogenic aerosol on climate] // Dokl. RAN, t. 340. №1. – 1995, – S. 98-100. (in Russian)*

*Latyshev A.V., Yushkanov A.A. Analiticheskoe reshenie modelnogo BGK-uravneniya Boltzmana v zadache o tempereturnom skachke s uchetom akkomodatsii energii [Analytical solution of the model BGK-Boltzmann equation in the problem of temperature jump with energy accommodation taken into account] // Matematicheskoe modelirovanie. – 1992. – S. 61-66. (in Russian)*