

*Bogatkin O.G.* Osnovy aviatsionnoy meteorologii [Fundamentals of aviation meteorology]. – SPb.: RGGMU. 2009. – 340 s. (in Russian)

*Chanysheva S.G., Smirnova E.N.* Klimaticheskoye opisaniye Tashkentskogo viloyata [Climatic description of the Tashkent region]. – Tashkent: NIGMI, 2011. – 161 s. (in Russian)

*Narovlyanskiy G.YA.* Aviatsionnaya klimatologiya [Aviation climatology]. – L.: Gidrometeoizdat, 1968. – 267 s. (in Russian)

Nauchno-prikladnoy spravochnik po klimatu SSSR. Vyp. 19 [Scientific and applied reference book on the climate of the USSR]. – L.: Gidrometeoizdat, 1989. – 304 s. (in Russian)

RD 52.21.692-2007. Trebovaniya k sostavleniyu klimaticheskogo opisaniya aerodrome [Requirements for compiling a climatic description of an aerodrome]. – M.: Rosgidromet. – 42 s. (in Russian)

Vozdushnyy kodeks Respubliki Uzbekistan. Gl., st. 32. Zakon Respubliki Uzbekistan ot 26 dekabrya 1997 g. № 549-I. [Air Code of the Republic of Uzbekistan. Chapter 3, Art. 32. Law of the Republic of Uzbekistan dated December 26, 1997 No. 549-I]. – Vedomosti Oliy Mazhlisa, 1998 g., № 3.

*Electronic resource:*

[spot.uz/ru/2020/02/12//airports](http://spot.uz/ru/2020/02/12//airports).

УДК: 551.51

## АЭРОЗОЛЬНЫЙ ФОРСИНГ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В ПУСТЫННЫХ РЕГИОНАХ

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

<sup>1</sup> Научно-исследовательский гидрометеорологический институт, [mikl-arushanov@rambler.ru](mailto:mikl-arushanov@rambler.ru)

<sup>2</sup> Каракалпакский научно-исследовательский институт естественных наук Каракалпакского отделения АН РУз, [tbibigul@mail.ru](mailto:tbibigul@mail.ru)

**Аннотация.** В статье конвективный вынос почвенных микрочастиц с пустынных поверхностей впервые рассматривается как фактор увеличения летних температур воздуха в Южном Приаралье. Для исследования этого процесса разработана двухблочная математическая модель. Первый блок предназначен для расчетов массовой концентрации аэрозоля в приземном слое атмосферы, обусловленной конвективными потоками. Полученная в первом приближении с рядом допущений и предположений количественная оценка показала существенность конвективного выноса аэрозоля в Южном Приаралье, увеличивающего концентрацию аэрозоля до  $1,2 \text{ мг/м}^3$ . Во втором блоке модели вычисляется повышение температуры прилегающего к подстилающей поверхности слоя воздуха (0–3 м) при молекулярном теплообмене частицами почвы, эмитирующими с раскаленной до  $70\text{--}80^\circ\text{C}$  пустынной поверхности. В результате численных экспериментов с различными вариантами монодисперсного аэрозоля с вариациями толщины термического пограничного слоя выявлено, что наибольший тепляющий эффект (до  $6^\circ\text{C}$ ) присущ для частиц с субмикронными размерами и резко по степенному закону снижается для частиц с радиусом больше  $1 \text{ мкм}$  ( $0,02^\circ\text{C}$  при  $R > 4 \text{ мкм}$ ). Расчеты для реального полидисперсного аэрозоля показали повышение температуры воздуха в дневные часы в среднем на  $0,4^\circ\text{C}$ . Отсутствие в Южном Приаралье осадков в июле–августе, противодействующих конвективному выносу почвенного аэрозоля вымыванием аэрозоля из атмосферы и смачиванием подстилающей поверхности, обеспечивает непрерывное поступление аэрозольных частиц в атмосферу, что увеличивает климатообразующий эффект рассматриваемого процесса. Показана значимость исследуемого форсинга ввиду прогрессирующего опустынивания во многих регионах планеты.

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

\* Ответственный автор: [mikl-arushanov@rambler.ru](mailto:mikl-arushanov@rambler.ru), тел.: +998 90 997-61-46

**Введение.** Радиационный форсинг – это внешне обусловленное изменение притока радиации (коротковолновой и длинноволновой) к слою (на любом уровне – от верхней границы атмосферы до подстилающей поверхности) в системе Земля – атмосфера.

Одной из самых значимых глобальных природно-экологических проблем является опустынивание земель, наносящее огромный ущерб аграрному сектору. Опустынивание также синергетически связано с другой не менее важной проблемой – глобальным потеплением климата. Контур положительной обратной связи, объединяющий эти две проблемы, порождает неустойчивость развития экосистем, ведущую к их деградации.

Особенно актуальна проблема опустынивания для Южного Приаралья, где максимально проявляются последствия аральского кризиса. Такие кардинальные изменения ландшафта, как смена водной поверхности на сушу (усыхание Аральского моря), сокращение площадей растительного покрова существенно меняют климатообразующие характеристики подстилающей поверхности (альbedo, эвапотранспирация, теплообмен).

С процессами опустынивания, происходящими во многих регионах планеты, непосредственно связан вынос почвенного аэрозоля с подстилающей поверхности. Существуют два отличающихся по механизму генерации типа выноса аэрозоля: ветровой (при скорости ветра больше 5 м/с) и конвективный (при скорости ветра 1-3 м/с). Механизм ветрового выноса аэрозолей связан с наличием отрывных течений в пограничном слое, обусловленных значительной турбулентностью атмосферы [Гледзер и др., 2009]. Конвективный вынос аэрозоля обусловлен сильным градиентом температуры на границе подстилающей поверхности и прилегающего слоя воздуха  $\approx 0,2$  м что создаёт условия для преодоления частицами тонкодисперсного аэрозоля вязкого подслоя [Гранберг, 2009; Шукуров, 2003; Гледзер и др., 2009].

Ветровой вынос почвенного и особенно минерального аэрозоля влияет на радиационный режим атмосферы, процессы облакообразования и климат. Особую роль играет субмикронная фракция аэрозоля, поскольку она имеет большое время жизни в тропосфере и переносится на большие расстояния [Shao et al., 1993]. Исследование воздействия сульфатного аэрозоля, вынесенного с осушенного дна Аральского моря [Тлеумуратова, 2018] показали, что в отдельных местах региона вследствие этого форсинга количество осадков увеличивается на 14 мм/год, летняя температура снижается на 3К.

Конвекция также является важным фактором тепло- и массопереноса в атмосфере, и способна поднять большое количество соли и пыли в верхние слои атмосферы. При слабом ветре и жаркой погоде (температура поверхности 50-80°C, относительная влажность 20-30%, ветер 2-3 м/с) механизм перемешивания воздуха в приповерхностном слое практически не отличается от механизма свободной конвекции тонкодисперсного пустынного аэрозоля [Шукуров, 2003].

Климатический эффект конвективного выноса аэрозоля не изучен, видимо, потому что этот процесс в отличие от ветрового выноса характерен лишь для аридных зон и указанный эффект физически выражен не так явно. В то же время закономерно предположение об определенном вкладе конвективного выноса аэрозоля в повышение летних температур в нижней тропосфере. Количественная оценка этого вклада особенно важна для Южного Приаралья, где участвовавшие волны тепла с экстремальными значениями (выше 39°C) увеличивают заболеваемость и, в частности, смертность населения от цереброваскулярных болезней на 17% [Спекторман, Петрова, 2008].

В данной статье оценивается конвективное увеличение концентрации аэрозоля над пустынными поверхностями и следующее из этого повышение приповерхностной температуры воздуха для летних месяцев.

**Условия и методы исследования.** Исследование проводилось методами математического моделирования для условий Южного Приаралья, окружённого тремя пустынями: Каракумы, Кызылкумом и Аралкумом. Оценивается вклад конвективного выноса в повышение температуры воздуха в нижнем 3 метровом слое (уровне жизнедеятельности человека). Подстилающая поверхность представляет собой песчаный грунт с близким к нулю общим проективным покрытием растений. Состав грунта в порядке убывания: кварц, карбонаты, слюда, соли, окись железа и др.

Поскольку почвенный аэрозоль является преимущественно поглощающим, рассеяние радиации в заднюю полусферу игнорируется. Заметим, что постакавальная суша Аральского моря последнего десятилетия в данном аспекте не рассматривается, так как сплошной солевой покров (60-70% сульфаты) увеличивает альбедо, а также рассеивающий сульфатный аэрозоль уменьшает поток прямой радиации, тем самым отепляющий эффект может быть очень незначительным и даже отрицательным.

Период моделирования: полуденные часы (12-13 часов) в июне-августе, использовались среднемесячные метеорологические величины летнего сезона (табл. 1) [Субботина, Чанышева, 2006].

Таблица 1

## Среднемесячные метеорологические характеристики Южного Приаралья

Table 1

## Average monthly meteorological characteristics of the Southern Aral Sea region

Месяцы	Температура воздуха, °С	Температура почвы, °С	Относительная влажность, %
Июнь	32	61	43
Июль	40	78	46
Август	36	69	49

Разработанная математическая модель оценки вклада конвективной эмиссии аэрозоля в повышение приповерхностной температуры воздуха состоит из двух блоков. В первом блоке вычисляется массовая концентрация аэрозоля, эмитирующего с конвективными токами. Для этого используются эмпирические соотношения, теоретическое и экспериментальное обоснование которых дано в работе [Гранберг, 2009], выполненной для пустынь Калмыкии:

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

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.

Соотношение (1) выполняется для частиц размером 0,15-5 мкм и динамической скорости  $u^* < 20$  см/с (корреляция  $r = 0,47$ ). Скорость  $u^*$  вычисляется на основе измерения средней горизонтальной скорости  $u(z)$  на высоте  $z = 3$  м по формуле [Гледзер и др, 2009]:

$$u_* = \frac{\chi u(z)}{\ln\left(\frac{z}{y_0}\right)}, \quad (2)$$

где  $y_0 = 10^{-4}$  м,  $\chi = 0,4$  – постоянная Кармана.

Как показано в работе [Гледзер и др., 2009], разность температур  $\delta T$  на поверхности почвы и на высоте 0,2 м зависит от  $u^*$  и при  $u^* < 20$  см/с меняется в диапазоне

10-30°C. Так как данная статья прикладного характера, мы сочли возможным заменить сложные выкладки для вычисления  $\delta T$  вариантными расчетами для значений 10, 20, 30 и 40°C.

Во втором блоке методом particle-in-cell вычисляется повышение температуры окружающего воздуха (в слое 0-3м) нагретыми взвешенными почвенными частицами. Алгоритм расчетов следующий. На первом шаге при предположении, что аэрозоль однороден и распределен равномерно в единице объема, вычисляется нагрев элементарного объема воздуха, приходящегося на одну частицу. Изотропный поток тепла от нагретой, взвешенной в воздухе сферической частицы равен [Щукин и др., 2012]:

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

где  $T_B$  – температура воздуха,  $R$  – радиус аэрозольной частицы,  $k_B$  – коэффициент теплопроводности воздуха при данной температуре. Коэффициент  $f$  определяется по формуле [Щукин и др., 2012]:

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

В (4)  $t_p = T_p/T_B$  – безразмерная температура поверхности частицы,  $T_p$  – температура поверхности частицы, равная с точностью до 1,5% температуре поверхности почвы. Для воздуха  $\omega = 0,85$  [Варгафтик, 1972]. Безразмерное изменение температуры вычисляется по формуле:

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

где  $A_0 = \varepsilon(t_p^2 - t_p^{1-\omega})$ ,  $A_1 = (1 + \varepsilon(2t_p - (1-\omega)t_p^{-\omega}))$ ,  $A_2 = \varepsilon\left(1 + \frac{\omega(1-\omega)}{2} \cdot t_p^{-(1+\omega)}\right)$ ,

$$\varepsilon = \frac{C_T}{1 + \omega} \left(\frac{\lambda}{R}\right) \quad (6)$$

$C_T$  – коэффициент скачка температуры  $\approx 2,2$  [Loyalka et al., 1978; Яламов и др., 1980; Маясов и др. 1988; Латышев, Юшканов, 1992]. Длина свободного пробега молекул воздуха равна [Савельев, 1970]

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

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

По отклонению массовой концентрации аэрозоля, вычисленной в первом блоке модели, находим счетную концентрацию  $N$  и объем воздуха  $dV$ , приходящийся на одну частицу. Предполагается, что стенки  $dV$  непроницаемы, а также, что  $dV$  инвариантно относительно размера и химического состава частицы.

По формуле  $\rho_B = \frac{p \cdot \mu}{R_T \cdot T_B}$  определяем плотность воздуха при данной температуре и

массу воздуха, приходящуюся на одну частицу  $m_B = \rho_B \cdot dV$ . Здесь  $\mu = 0,029$  кг/моль – молярная масса воздуха,  $R_T = 8,31$  Дж/моль·К – универсальная газовая постоянная.

Далее вычисляется изменение температуры  $\Delta T_i$  элементарного объема  $dV$  воздуха, вызванное теплоотдачей одной частицы по формуле

$$\Delta T = \frac{Q}{c \cdot m_B} \quad (8)$$

где  $c = 1005$  Дж/кг·К – удельная теплоёмкость воздуха.

При предположении о химической однородности и монодисперсности аэрозоля тепловой эффект от ансамбля частиц равен  $\Delta T$ .

На втором шаге алгоритма расчетов модель реализуется для каждого вида частиц песчаного грунта с вариациями размеров – 0,2, 0,5, 1,1, 3 и 5 мкм.

Третий шаг алгоритма второго блока состоит в определении теплового эффекта реального полидисперсного неоднородного аэрозоля. Расчеты проведены для нескольких вариантов функций распределения веществ и размеров аэрозоля. При этом, по-прежнему, предполагается, что элементарный объем нагреваемого воздуха инвариантен относительно вида и размера частиц, расчеты выполнены в первом приближении. Более детальное исследование процесса с учетом скорости конвекции, турбулентной диффузии, нелинейных эффектов, вертикальных градиентов и теплообмена пустынных участков с соседними качественно отличающимися ландшафтами даст более полную картину процесса.

**Результаты и обсуждение.** Численные эксперименты с вышеизложенной моделью с различными вариантами функций распределения размеров частиц и веществ, а также толщины термического погранслоя выявили, что искомое  $\Delta T$  наиболее чувствительно к вариациям дисперсности. На рис. 1, отображающем результаты расчетов для монодисперсного аэрозоля видно, что максимальные  $\Delta T$  соответствуют субмикронным размерам частиц. В этом же диапазоне проявляется значимость толщины термического погранслоя  $\delta T$ : значения  $\Delta T$  падают от 10°C до 0,8°C. Различия, обусловленные  $\delta T$ , нивелируются для частиц, радиус которых превышает 1 мкм (табл. 2).

*Таблица 2*

**Зависимость изменения  $\Delta T$  от радиуса частиц монодисперсного аэрозоля и толщины термического пограничного слоя (июнь)**

*Table 2*

**Dependence of the change in  $\Delta T$  on the radius of particles of monodisperse aerosol and thermal boundary layer thickness (June)**

$\delta T, ^\circ\text{C}$	R, мкм	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	$\delta T, ^\circ\text{C}$	R, мкм	$\Delta T, ^\circ\text{C}$
10	0,2	4,59	30	0,2	8,68
	0,5	1,01		0,5	1,91
	1,1	0,242		1,1	0,46
	3	0,036		3	0,067
20	0,2	6,86	40	0,2	10,26
	0,5	1,51		0,5	2,26
	1,1	0,362		1,1	0,54
	3	0,053		3	0,08

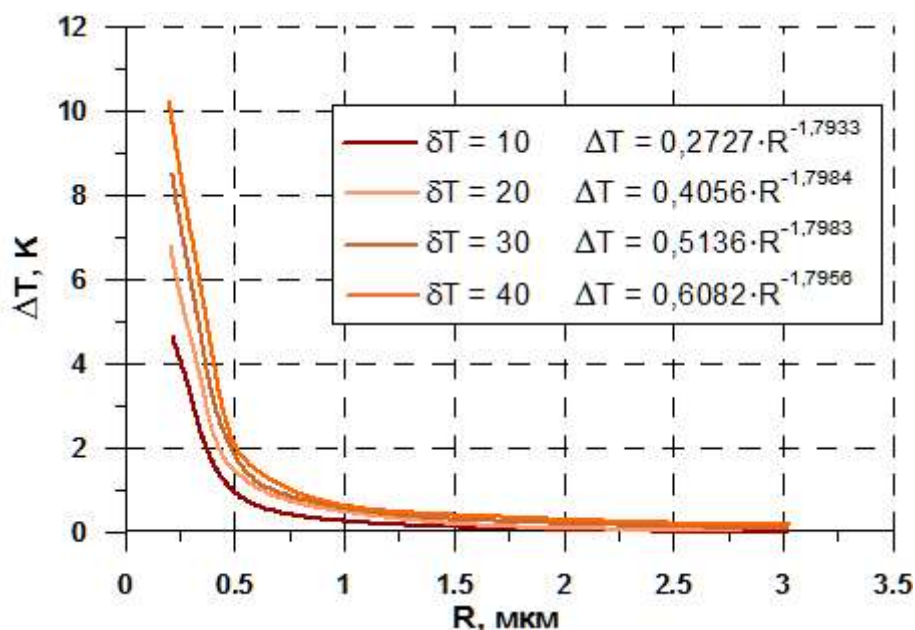


Рис. 1 Зависимость изменения  $\Delta T$  от радиуса частиц монодисперсного аэрозоля и толщины термического пограничного слоя (июнь).

Fig. 1 Dependence of the change in  $\Delta T$  on the radius of monodisperse aerosol particles and the thickness of the thermal boundary layer (June).

Реальный аэрозоль, эмитирующий конвективными токами с пустынной поверхности конечно же полидисперсный. Изменения температуры  $\Delta T$  слоя воздуха, прилегающего к подстилающей поверхности, как следует из приведенных результатов, существенно зависит от функции распределения размеров частиц. Наиболее характерная для рассматриваемого процесса [Маясов и др., 1988; Щукин и др., 2012] функция распределения следующая:

$$f(R)=0,0386R^{-1,678} \quad (9)$$

Расчеты, проведенные для этой функции распределения показали, что  $\Delta T$  прямо пропорционально массовой концентрации, значения для июня и августа практически совпадают, для июля – выше на 0,1-0,2°C (рис. 2).

В целом проведенное исследование показало значимость конвективного выноса аэрозоля с пустынных поверхностей как форсинга приповерхностной температуры воздуха в летние месяцы. Достаточно отметить, что вклад в произошедшее за последние два десятилетия в Южном Приаралье потепление летнего сезона на 2°C оценивается как 10-30%. 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 усиливает отепляющий эффект.

Значение форсинга летних температур воздуха при конвективном выносе аэрозоля возрастает ввиду прогрессирующего опустынивания во многих регионах земного шара (рис. 3).

Особенно опасны в климатическом аспекте опустынивание типа обезлесение и миграции песков. Простые расчеты в соответствии с разработанной моделью показывают, что увеличение пустынных площадей на 6624 тыс. кв. км (красный цвет на рис. 3) приведет к увеличению средней глобальной температуры на 14%.

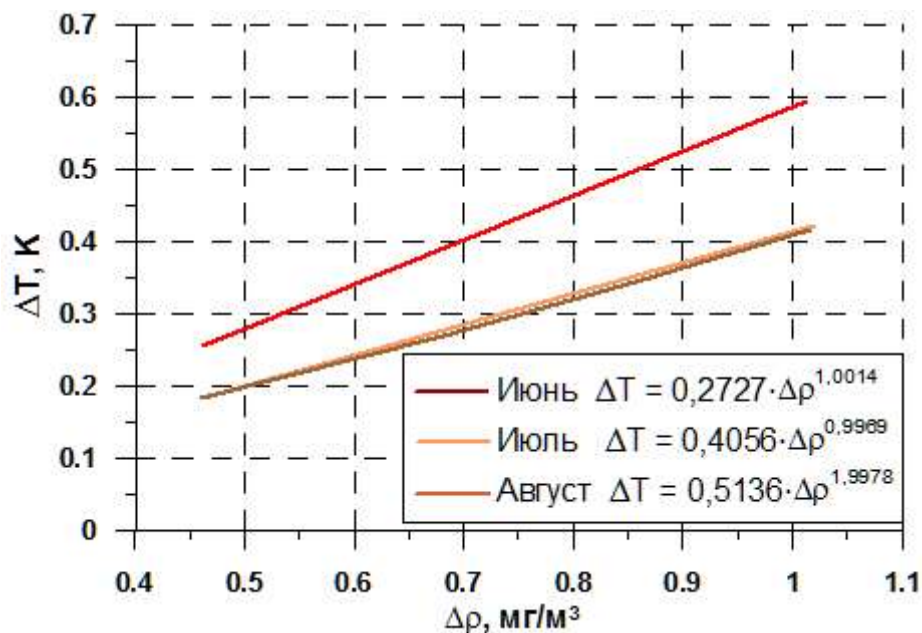


Рис. 2. Зависимость изменения  $\Delta T$  от массовой концентрации полидисперсного аэрозоля и месяца летнего сезона

Fig. 2. Dependence of  $\Delta T$  change on the mass concentration of polydisperse aerosol and the month of the summer season



Рис. 3. Карта опустынивания Земли: светло-жёлтый цвет — низкая угроза опустынивания, [[https://everipedia.org/wiki/lang\\_en/Desertification](https://everipedia.org/wiki/lang_en/Desertification)]

Примечание: Цифры указывают степень потепления климата в аридных зонах

Fig. 3. Earth desertification map: light yellow color - low threat of desertification, [[https://everipedia.org/wiki/lang\\_en/Desertification](https://everipedia.org/wiki/lang_en/Desertification)]

Note: The numbers indicate the degree of climate warming in arid zones

**Выводы.** Конвективный вынос аэрозоля с пустынных поверхностей, ранее, не принимаемый в расчёт, необходимо учитывать, как форсинг приповерхностной

температуры воздуха в летние месяцы. Наличие обратной положительной связи между потеплением и рассматриваемым форсингом, а также повышенные концентрации аэрозоля, препятствующие выхолаживанию ночью, являются причиной отепляющего эффекта.

**Вклад авторов. М.Л. Арушанов:** Постановка задачи, анализ, редактирование текста, руководство. **Б.С. Тлеумуратова:** Разработка модели, расчет, анализ, написание текста. **Б.Ж. Нарымбетов:** Сбор, обработка данных, систематизация материала, анализ. Все авторы прочитали и согласны с подготовленной к публикации версией рукописи

## ЛИТЕРАТУРА

*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. – 2009. – Т. 426. – №3. – С. 380-385.

*Гранберг И.Г.* Физические механизмы и экологические проблемы загрязнения атмосферного пограничного слоя над неоднородными поверхностями. Дисс. докт. физ.-мат. наук. – 2009. – 196 с.

*Латышев А.В., Юшканов А.А.* Аналитическое решение модельного БГК – уравнения Больцмана в задаче о температурном скачке с учетом аккомодации энергии // Математическое моделирование. – 1992. – 4:10. – С. 61-66.

*Маясов Е.Г., Юшканов А.А., Яламов Ю.И.* О термофорезе нелетучей сферической частицы в разреженном газе при малых числах Кнудсена // Письма в ЖТФ. – 1988. – 14:6. – С.498-502.

*Савельев И.В.* Молекулярная физика. Том I. – М.: Наука, 1970. – 202 с.

*Спектрман Т.Ю., Петрова Е.В.* Использование климатических индексов для оценки воздействий изменения климата на здоровье населения в Узбекистане / В сб. «Последствия изменения климата в Узбекистане, вопросы адаптации». Бюллетень №7. – 2008. – С. 37-46.

*Субботина О.И., Чанышева С.Г.* Климат Приаралья. – Ташкент: НИГМИ. – 2006. – 210 с.

*Тлеумуратова Б.С.* Математическое моделирование влияния трансформаций экосистемы Южного Приаралья на почвенно-климатические условия. Диссер. докт. физ.-мат. наук. – Ташкент, 2018. – 204 с.

*Шукуров К.А.* Флуктуации концентрации и потоки аэрозоля в конвективных условиях. Автореферат дисс. канд. физ.-мат. наук. – 2003. – 34 с.

*Шукин Е.Р., Малай Н.В., Шулиманова З.Л.* Молекулярный теплообмен с газообразной средой, сильно нагретой неподвижной твердой умеренно крупной сферической частицы // Научные ведомости БЕЛУ №23(142), Вып. 29. – 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. – 1980. – Т. 254. – С.343-346.

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

*Loyalka S.K., Sielvert C.E., Thomas I.R.* Temperature – jump problem with arbitrary accommodation // Phys. Fluids. – 1978. – 21:5. – PP. 854-855.

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

*Электронные ресурсы:*

<http://www.pogodaiklimat.ru/mf/index.php?topic=1163.220>

[https://everipedia.org/wiki/lang\\_en/Desertification](https://everipedia.org/wiki/lang_en/Desertification)