УДК 551.577+544.772

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ НА ИХ ВЫМЫВАНИЕ ИЗ АТМОСФЕРЫ ДОЖДЕВЫМИ КАПЛЯМИ

© 2020 г. Д. А. Припачкин^{а, *}, А. К. Будыка^а

 ^аНИЯУ МИФИ, Каширское ш., 31, Москва, 115409 Россия *e-mail: dmrwer@mail.ru
 Поступила в редакцию 15.08.2019 г. После доработки 30.10.2019 г.
 Принята к публикации 20.11.2019 г.

Предложена микрофизическая модель для оценки вымывания аэрозольных частиц искусственного происхождения из атмосферы дождевыми каплями, рассматривающая совокупность дождевых капель как сильноразреженную фильтрующую среду. Численно исследовано влияние аэродинамических параметров аэрозольных частиц на эффективность их захвата системой капель дождя E и коэффициент вымывания Λ при различных интенсивностях осадков I. Предложена новая формула для оценки эффективности захвата аэрозольных частиц системой капель дождя. Проведено сравнение предложенной модели с другими известными моделями. Установлено, что предложенная модель более строго описывает взаимодействие аэрозольных частиц и дождевых капель, чем рассмотренные микрофизические модели.

Ключевые слова: аэрозольные частицы, эффективность захвата аэрозольных частиц, коэффициент вымывания, микрофизическая модель вымывания аэрозольных частиц из атмосферы **DOI:** 10.31857/S0002351520020108

введение

Перенос дисперсных атмосферных загрязнений различного происхождения (в том числе радиоактивных) осуществляется главным образом на субмикронных частицах — носителях [1, 2]. Для описания переноса используются разномасштабные модели рассеивания атмосферных примесей [3–5], в той или иной степени учитывающие механизмы вымывания аэрозольных частиц атмосферными осадками. Такое вымывание принято разделять на два типа: внутриоблачное и подоблачное [6]. В случаях мезомасштабного переноса при приземных выбросах техногенных аэрозолей в атмосферу подоблачное вымывание будет преобладающим механизмом [6].

Общие теоретические представления о механизме вымывания аэрозольных частиц дождевыми каплями были описаны в 40–50-х гг. ХХ в. [7– 9] и подтверждены экспериментально в исследованиях [10, 11]. Процесс вымывания частиц осадками иллюстрирует рис. 1.

Основным параметром, определяющим подоблачное вымывание аэрозольных частиц, является коэффициент подоблачного вымывания, Λ (далее, коэффициент вымывания, 1/c), равный отношению скорости накопления аэрозольных частиц в выпавших осадках к среднему количеству частиц в облаке за время выпадения осадков [6, 12].

Результаты расчетов [7–9] и экспериментальных исследований [10, 11] показали, что величина A зависит от эффективности захвата аэрозольных частиц каплями дождя, Е, и от скорости падения капли, и, м/с. В свою очередь, эффективность захвата Е является функцией многих параметров (в первую очередь, размеров капли D и аэрозольной частицы d). Для оценки влияния этих параметров на подоблачное вымывание искусственных радиоактивных аэрозолей (например, ¹³⁷Cs) необходимо сопоставить между собой теоретические оценки коэффициента вымывания по различным моделям, а затем рассмотреть формирование загрязнения местности при осадках различной интенсивности аэрозолей с различным дисперсным составом.

В последнее время с развитием вычислительных ресурсов появилась возможность по-иному взглянуть на описание процессов подоблачного вымывания искусственных аэрозолей и перейти от эмпирических моделей с осредненными параметрами к моделям, описывающим микрофизику процессов вымывания аэрозольных частиц дождевыми каплями.

Величина *E* зависит не только от размеров, но и от плотности аэрозольных частиц, ρ, и параметров дисперсионной среды (давления, вязкости и температуры воздуха).



Рис. 1. Процесс вымывания аэрозольных частиц дождевыми каплями.

С учетом распределения по размерам дождевых капель коэффициент вымывания для частицы диаметром *d*, согласно [6], можно представить в виде

$$\Delta(d) = \int_{0}^{\infty} E(D,d)u(D)\frac{\pi D^2}{4}N(D)dD,$$
 (1)

где N(D) — плотность распределения дождевых капель, $1/M^4$.

Если представить, что размеры дождевых капель одинаковые, то формула (1) переходит в

$$\Lambda(d) = E(D,d)u(D)\frac{\pi D^2}{4}n(D), \qquad (2)$$

где n(D) — концентрация капель в единичном объеме, $1/M^3$. С учетом того, что интенсивность дождя *I* равна $n(D)u(D)\frac{\pi D^3}{6}$, коэффициент вымывания представим в виде:

$$\Lambda(d,D) = \frac{3}{2}E(D,d)I\frac{1}{D}.$$
(3)

МОДЕЛЬ ЗАХВАТА

Концентрация дождевых капель даже при интенсивном дожде не превышает 10^3 м^{-3} [13], а размеры аэрозольных частиц на 3–4 порядка величины меньше характерного размера капель (0.5– 5 мкм и 1–10 мм соответственно). Очевидно, соседние капли дождя не оказывают влияния на поле течения воздуха вблизи капли при ее движении и, следовательно, вероятность захвата аэрозольных частиц дождевой каплей не зависит от наличия или отсутствия соседних капель. Поэтому совокупность дождевых капель можно представить как систему изолированных сферических препятствий, образующих фильтрующую среду для улавливания аэрозолей. Если рассмотреть взаимодействие капли и аэрозольной частицы в системе координат, связанной с каплей, то в такой системе капля будет неподвижной, а аэрозольная частица будет двигаться в направлении капли со скоростью, зависящей от диаметра капли и равной скорости ее гравитационного осаждения (от 1 до 7 м/с).

Предположим, что плотность аэрозольных частиц постоянна (равна ρ) а ее аэродинамический диаметр равен *d*. Тогда эффективность улавливания аэрозолей *E* системой дождевых капель диаметром *D* можно связать с коэффициентом захвата η следующим образом:

$$E(D, d) = 1 - e^{\gamma \eta}, \qquad (4)$$

где $\gamma = \frac{4\alpha H}{\pi D}$ – коэффициент, зависящий от макроскопических параметров фильтрующей среды;

 $\alpha = \frac{\pi D^3 n(D)}{6}$ – плотность упаковки дождевых капель (меняется в пределах от 10⁻⁵ до 10⁻¹⁰ для капель от 0.1 до 6 мм соответственно); *H* – размер аэрозольного облака по вертикали (от 10² до 10³ м); $\eta = \eta_{st} + \eta_D + \eta_{DK}$; $\eta_{st} = St - St_*, \eta_D =$ $4 \times \left(1 + 0.4 \text{Re}^{\frac{1}{2}} Sc^{\frac{1}{3}}\right)$

$$=\frac{4\times\left(1+0.4\text{ Ke} \text{ Sc}\right)}{\text{Re }Sc}, \eta_{DK}=4r\left\{\frac{\mu}{\mu_{w}}+r\left(1+2\text{ Re}^{\frac{1}{2}}\right)\right\}-$$

коэффициенты инерционного, диффузионного захвата и захвата за счет зацепления аэрозольной частицы дождевой каплей, соответственно; *St* =

$$=\frac{\rho d^2 C_C u(D)}{9 \mu D}$$
 число Стокса; *St*_{*} – критическое

число Стокса [14]; Re = $\frac{\rho_1 D u(D)}{\mu}$ — число Рейнольдса, вычисленное для дождевой капли диаметром D; $Sc = \frac{\mu}{\rho_1 D_{\text{diff}}}$ — число Шмидта; μ , μ_w — динамическая вязкость воздуха и воды соответственно, Па · с, ρ_1 — плотность воздуха, кг/м³; C_c — поправка Каннингема на скольжение для аэрозольной частицы; D_{diff} — коэффициент диффузии аэрозольных частиц в воздухе, м²/с; r = d/D — параметр зацепления.

Выражение (3) можно распространить на весь спектр аэрозольных частиц и дождевых капель.

Следовательно, формула (3) с учетом (4) может быть использована в модели вымывания аэрозольных частиц каплями дождя.

В большинстве моделей вымывания искусственных аэрозолей из атмосферы, как показано в обзоре [15], величина Л представляется как функция только интенсивности дождя *I*:

$$\Lambda = \varphi I^{\beta}, \tag{5}$$

где: ϕ и β — эмпирические коэффициенты, используемые в различных приближениях. В формуле (5) коэффициент вымывания в явном виде не зависит от размеров дождевой капли, аэрозольной частицы и эффективности захвата частиц каплями. Однако в некоторых моделях [15] значение эффективности захвата является фиксированным для определенного диапазона размеров аэрозольных частиц. В конечном счете, это не меняет вид (4) эффективность захвата аэрозолей каплями определяет значение коэффициента ϕ , что является лишь осреднением реальных процессов захвата.

В монографии [6] утверждается, что из-за невозможности учесть все особенности взаимодействия аэрозольных частиц с дождевыми каплями в грубом приближении можно использовать подход, при котором коэффициент вымывания зависит только от интенсивности дождя: чем сильнее дождь, тем больше аэрозольных частиц будет вымыто из атмосферы. Однако, как показано в работах [14, 16, 17], это справедливо только для частиц с аэродинамическим диаметром более 10 мкм. В диапазоне частиц от 0.1 до 10 мкм, наиболее интенсивно вовлекаемых в перенос, коэффициент вымывания должен определяться выражением (3) с учетом (4).

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ВЫМЫВАНИЯ

Коэффициенты вымывания Λ рассчитаны по предложенной в настоящей работе модели (формула (3) с учетом (4)), базовой модели подоблачного вымывания кода NAME [15], модели [18] и микрофизическим моделям [14] и [17] для плотности частиц 1000 кг/м³ и интенсивности дождя 5 мм/ч (см. табл. 1). В работе [19] было показано, что средний размер дождевой капли \overline{D} зависит от интенсивности дождя *I*, как $\overline{D} = 0.7I^{0.25}$, мм. Если в формуле (3) заменить *D* на \overline{D} , то в явном виде величина Λ будет зависеть только от эффективности захвата аэрозольных частиц каплями дождя *E* и интенсивности дождя *I*.

В расчетах использованы погодные условия согласно классификации Паскуилла [20]. Оценки выпадений получены на оси формируемого следа на поверхности земли на расстоянии до 20 км от источника выброса.

Таблица 1. Коэффициенты вымывания, вычисленные по различным моделям

Источник данных	Λ, 1/c
NAME [15]	$8.4 \times 10^{-5} I^{0.79}$
Махонько [18]	$2.6 \times 10^{-5}I$
Бакланов [14]	$\frac{1}{0.7}E\left(D,d\right)I^{0.75}$
Loosmore [17]*	$\frac{3}{2\times0.7}E(D,d)I^{0.75}$
Предложенная модель	$\frac{3}{2 \times 0.7} E(D,d) I^{0.75}$

Примечание. * — в модели [17] выражение для эффективности захвата E(D, d) отличается формой записи от предложенной модели.

Расчеты показали, что коэффициент вымывания, полученный по моделям [15] и [18], не зависит от размера аэрозольной частицы. Это связано с тем. что в этих моделях используется средняя фиксированная эффективность захвата аэрозольных частиц дождевыми каплями. Для частиц с диаметром более 0.1 мкм диффузионным захватом можно пренебречь. В диапазоне от 0.1 до 1 мкм (область разрыва Гринфилда [21]) преоблалает механизм зацепления, однако из-за большой разницы в размерах между частицами и каплями (0.5-8 мм) этот эффект незначителен (рис. 2). Поэтому основным механизмом вымывания аэрозолей в рассмотренном диапазоне размеров частиц (от 0.1 до 30 мкм) является инерционный захват дождевой каплей.

Как следует из рис. 2 и 3, в предложенной модели, и моделях [14] и [17], по сравнению с [15] и [18], рост или уменьшение эффективности захвата частиц каплями приводит к соответствующему росту или уменьшению коэффициента вымывания в зависимости от размера аэрозольной частицы в несколько раз в области инерционного захвата (a > 2 мкм) и на несколько порядков в диффузионной области и области с преобладанием зацепления. Коэффициенты вымывания, определенные с помощью предложенной модели и модели [17], совпадают в области диффузионного захвата и зацепления, и в полтора раза превышают значения, полученные с помощью модели [14]. Это связано с тем, что в модели [14] используется более раннее приближение для коэффициента вымывания из работы [19]. Различия в предложенной модели и в модели [17] в области инерционного захвата аэрозолей составляют не более 30-40% для частиц менее 10 мкм и асимптотически сближаются для частиц более 10 мкм. Эти различия не сказываются существенно на коэффициенте вымывания и связаны с формой записи коэффициента инерционного захвата в предложенной модели и модели [17].

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА том 56 № 2 2020



Рис. 2. Зависимость коэффициента вымывания от размера аэрозольной частицы при интенсивности дождя 5 мм/ч. *I* – Предложенная модель, *2* – Бакланов и др. [14], *3* – Махонько [18], *4* – Loosmore [17], *5* – код NAME [15].



Рис. 3. Зависимость коэффициента вымывания от интенсивности дождя для частиц с диаметром 4 (а) и 8 мкм (б). *I* – Предложенная модель, *2* – Бакланов и др. [14], *3* – Махонько [18], *4* – Loosmore [17], *5* – код NAME [15].

С ростом интенсивности дождя при фиксированных размерах (4 и 8 мкм) и плотности (1000 кг/м³) коэффициент вымывания растет линейно по [15] и [18]. По предложенной модели и моделям [14, 17] для частиц 4 мкм коэффициент вымывания сопоставим с [15] и [18], но уже для 8 мкм он выше в 2–5 раз (рис. 3).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ МЕСТНОСТИ ИСКУССТВЕННЫМИ РАДИОАКТИВНЫМИ АЭРОЗОЛЯМИ

Покажем, как влияют на моделирование загрязнения местности предложенная в работе микрофизическая модель вымывания аэрозольных частиц и часто используемая в расчетах модель [18] в условиях фиксированной интенсивности дождя для всей области моделирования. Расчеты выполнены с помощью системы ПАРРАД [21]. Будем моделировать распространение в атмосфере искусственных радиоактивных аэрозолей ¹³⁷Cs различного дисперсного состава. Пусть условный выброс аэрозолей ¹³⁷Cs (1 Бк) происходит на высоте 100 м от поверхности земли, категория устойчивости атмосферы по классификации Паскуилла [20] соответствует категории *D* (нейтральная стратификация), скорость ветра на высоте 10 м – 4 м/с, плотность частиц 1000 и 2500 кг/м³. Рассмотрены три случая переноса: без осадков, с осадками (дождь) при интенсивности 1 и 10 мм/ч для трех групп аэрозольных частиц с диаметром 1,



Рис. 4. Зависимость Л от *I* для плотностей частиц 1000 (а) и 2500 (б) кг/м³. Частицы с диаметром 8 (*1*), 4 (*2*) и 1 мкм (*3*). Модель [18] (*4*).



Рис. 5. Зависимость плотности выпадений на поверхность земли на оси следа распространения выброса для частиц 1 (а), 4 (б) и 8 (в) мкм. *1* – без осадков, *2*, *3* – модель [18] осадки 1 и 10 мм/ч, *4*, *5* – предложенная модель, плотность частиц 1000 кг/м³ и осадки 1 и 10 мм/ч, *6*, *7* – предложенная модель, плотность частиц 2500 кг/м³ и осадки 1 и 10 мм/ч.

4 и 8 мкм (рис. 4 и 5). Расчеты проводили при условии, что для аэрозольных частиц учитывается сухое осаждение в атмосфере на сглаженную поверхность [22]. Скорость сухого осаждения для частиц 1, 4 и 8 мкм равна 0.008, 0.08 и 0.8 см/с соответственно.

Из рис. 4 следует, что с ростом размера аэрозольных частиц коэффициент вымывания возрастает во всем рассмотренном диапазоне интенсивности дождя (1–20 мм/ч). Влияние плотности частиц на коэффициент вымывания существеннее для более мелких частиц, но только если $St > St_*$.

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА том 56 № 2 2020

Так, с изменением плотности в 2.5 раза коэффициент вымывания изменяется в 2.5 раза для частиц с диаметром 4 мкм и только на 15% для частиц с диаметром 8 мкм. Коэффициент вымывания для частиц 4 и 8 мкм по предложенной модели выше на порядок величины, чем по модели [18] и ниже на 3 порядка для частиц 1 мкм, независимо от плотности частиц.

Из рис. 5 следует, что модель [18] не может использоваться в полной мере для описания механизма подоблачного вымывания дождем аэрозольных частиц в диапазоне от 0.1 до 10 мкм, куда в подавляющем большинстве попадают искусственные радиоактивные аэрозоли, попадающие в свободную атмосферу. Использование модели [18] может искажать картину загрязнения местности, как в большую, так и в меньшую сторону в зависимости от аэродинамических характеристик аэрозольных частиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена модель подоблачного вымывания аэрозольных частиц из атмосферы, учитывающая размеры аэрозольных частиц и дождевых капель. По сравнению с известными моделями, использующими осредненные параметры [15] и [18], данная модель является более чувствительной к аэродинамическим характеристикам аэрозольных частиц и дождевых капель и относится к классу микрофизических моделей.

Коэффициент вымывания Л, в виде (3), совпадающий с представленным в монографии [24], и учитывающий эффективность захвата аэрозолей дождевыми каплями в форме (4), делает предложенную модель более строгой по сравнению с микрофизическими моделями [14] и [17].

Методом численного моделирования установлено, что в зависимости от характеристик аэрозольных частиц, интенсивности дождя и размера дождевых капель коэффициент вымывания может отличаться в несколько раз от величины, полученной по моделям с осредненными параметрами.

Для более глубокой верификации модели необходимо сопоставить наблюдаемые случаи загрязнения местности искусственными радиоактивными аэрозолями, обусловленные их вымыванием из атмосферы, с результатами расчетов, полученными по предложенной модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

 Ogorodnikov B.I., Budyka A.K., Skitovich V.I., Brodovoi A.V. Characteristics of aerosols in the boundary layer of the atmosphere over Moscow // Izvestiya RAS. Atmospheric and Oceanic Physics. 1996. V. 32. № 2. P. 149–157.

- 2. Budyka A.K., Ogorodnikov B.I. Radioactive aerosols generated by Chernobyl // Russian J. Physical Chemistry A. 1999. V. 73. № 2. P. 310–319.
- 3. *Turner D.B.* Workbook of atmospheric dispersion estimates: an introduction to dispersion modeling (2nd ed.). CRC Press, 1994. 192 p.
- Brioude J., Arnold D., Stohl A. et al. The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART-WRF version 3.1. // Geosci. Model Dev. 2013 V. 6. P. 1889–1904.
- Беликов В.В., Головизнин В.М., Семенов В.Н. и др. НОСТРАДАМУС – компьютерная система прогнозирования радиационной обстановки. Верификация модели атмосферного переноса примеси // Труды ИБРАЭ. Моделирование Распространения Радионуклидов в окружающей среде. М.: Наука, 2008. С.41–103.
- 6. Метеорология и атомная энергия // Под ред. Бызовой Н.Л. Л.: Гидрометеоиздат, 1971. 648 с.
- Langmuir I. The production of rain by a chain reaction in cumulus clouds at temperatures above freezing // J. Meteorol. 1948. V. 5. P. 175–192.
- 8. *Chamberlain A.C.* Aspects of travel and deposition of aerosol and vapor clouds. Atomic Energy Research Establishment. Harwell. Berks. (England), 1953. AERE HP/R 1261. 34 p.
- 9. *Mason B.J.* The Physics of Clouds. Oxford University Press, 1957. 481 p.
- May F.G. The Washout of Lycopodium Spores by Rain // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 1958. P. 451–485.
- Kinzer G.D., Cobb W.E. Laboratory measurements and analysis of the growth and collection efficiency of cloud droplets // J. Met. 1958. V. 15(2). P. 138–148.
- 12. Бурцев. И.И. О Вымывании осадками искусственных радиоактивных аэрозолей из атмосферы // В сб. "Радиоактивные изотопы в атмосфере и их использование в метеорологии". М.: Атомиздат, 1965. С. 217–229.
- Marshall J.S., Palmer W.M. The distribution of raindrops with size // J. Meteorol. 1948. V. 5(2). P. 165– 166.
- Balklanov, A., Sørensen J.H. Parameterization of radionuclide deposition in atmosphericlong-range transport modelling // Phys. Chem. Earth (B). 2001. V. 26. P. 787–799.
- 15. Webster H., Thomson D. The NAME wet deposition scheme Forecasting Research // Technical Report N

 9 584, 2014. 41 p.
- 16. *Andronache C*. Estimated variability of below-cloud aerosol removal by rainfall for observed aerosol size distribution // Atmos. Chem. Phys. 2003. V. 3. P. 131–143.
- Loosmore G.A., Cederwall R.T. Precipitation scavenging of atmospheric aerosols for emergency response applications: testing an updated model with new real-time data // Atmospheric Environment. 2004. V. 38. P. 993–1003.
- Махонько К.П., Дмитриева Г.В. Способность различных типов осадков к вымыванию продуктов деления из атмосферы и характеристики вымывания // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1966. Т. 2. № 3. С. 297–304.

- Slinn W.G.N. Precipitation scavenging // Atmospheric Sciences and Power Production. U.S. Department of Energy. 1983. P. 466–532.
- Pasquill F. The estimation of the dispersion of windborne material // The Meteorological Magazine. 1961. V. 90. № 1063. P. 33–49.
- Greenfield S. Rain scavenging of radioactive particulate matter from the atmosphere // J. of Meteorology. 1957. V. 14. № 2. P. 115–125.
- 22. Арутюнян Р.В., Припачкин Д.А., Семенов В.Н. и др. Описание системы Прогнозирования Аварийного

Распространения Радионуклидов в Атмосфере Для Действующих Российских АЭС (ПАРРАД). Технология и Функционирование // Препринты ИПМ. им. М.В. Келдыша. 2016. № IBRAE. 42 с.

- 23. *Giardina M., Buffa P.* A new approach for modeling dry deposition velocity of particles // Atmospheric Environment. 2018. V. 180. P. 11–22.
- Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric Chemistry And Physics. From Air Pollution to Climate Change. Second Edition. John Wiley & Sons. Inc, 2006. 1248 p.

The Influence of the Parameters of Aerosol Particles for Their Washout from the Atmosphere by Rain Drops

D. A. Pripachkin^{1, *} and A. K. Budyka¹

¹MEPHI, Kashirskoe shosse, 31, Moscow, 115409 Russia *e-mail: dmrwer@mail.ru

A microphysical model is proposed to assess the washout of aerosol particles of artificial origin from the atmosphere by raindrops, considering the set of raindrops as a highly rarefied filter medium. The effect of aerodynamic parameters of aerosol particles on the efficiency of their capture by a system of raindrops at different precipitation intensities is numerically investigated. A new formula is proposed to evaluate the efficiency of aerosol particles capture by the raindrop system. The proposed model is compared with other known models. It is established that the proposed model more strictly describes the interaction of aerosol particles and raindrops than the considered microphysical models.

Keywords: aerosol particles, efficiency of aerosol particles capture, scavenging coefficient for aerosols, microphysical model of aerosol particles washout from the atmosphere