

УДК 551.510.42

Р. О. г. Гусейнова,
Б. М. Азизов,
Х. С. Халилова

**Обобщенная модель процесса
влажностного роста аэрозоля
береговых зон. Методика определения
типа берегового аэрозоля**

Национальная академия авиации, г.Баку,
Азербайджанская Республика
e-mail: asadzade@rambler.ru

Аннотация. Рассмотрена возможность моделирования процесса геометрического роста размеров берегового аэрозоля в результате увлажнения. На базе известной модели увлажнения берегового аэрозоля разработана общая модель аналогичного назначения. Уточнены взаимосвязи между вспомогательными переменными, используемыми в известной модели. Работоспособность предложенной методики по определению типа берегового аэрозоля подтверждена результатами проведенных модельных исследований. с использованием измерения размера аэрозольной частицы при заданной величине RH.

Ключевые слова: береговой аэрозоль, увлажнение, гигроскопический рост, оптическая толщина, моделирование.

Введение

Хорошо известно, что береговые зоны представляют собой особый интерес с географической, геополитической и военной точек зрения. Часто береговые зоны являются пограничными и охраняемыми зонами и защита этих зон от разведывательных средств противника является особо актуальной задачей. В этом смысле использование природных или искусственных оптических экранов является одним вариантом решения задачи защиты от разведывательных оптоэлектронных средств противника. В качестве непрозрачных оптических экранов могут быть использованы аэрозоли различного происхождения. Ценность аэрозоля в указанном назначении заключается в его свойстве увлажнения, сопровождающегося увеличением геометрических размеров. Очевидно, что увеличение размеров аэрозольных частиц, в свою очередь, приводит к увеличению оптической толщины аэрозольного экрана, что содействует увеличению степени защищенной объектов специальных береговых зон от оптоэлектронных средств разведки. Увлажнение аэрозоля происходит из-за воздействия влаги, содержащейся в воздухе. Физическому описанию указанного процесса посвящено большое количество работ (см. например [1-6]). Целью настоящей статьи является исследование возможности оптимизации увлажнения аэрозоля береговой зоны в результате воздействия такого физического фактора как водяные пары, содержащихся в воздухе береговых зон.

Особенности аэрозоля береговой зоны. Модель зависимости от относительной влажности воздуха

Как отмечается в работе [7], аэрозоль типа морского спрея (SSA) играет важную роль в процессе конденсации концентрационных ядерных точек облаков. Химический состав SSA включает такие ионы как Na^+ , Mg^+ , Ca^{2+} , K^+ а в результате взаимодействия с атмосферой SSA также включает себя азотистую, серную и др. кислоты. Имея размеры в сухом состоянии в пределах $0,8 \div 8,0$ мкм после увлажнения аэрозольные частицы увеличивают размер на 100% и более. Согласно [8], концентрация берегового аэрозоля сильно зависит от направления ветра: при направлении ветра от моря к берегу концентрация в три раза выше, чем при ветре от берега к морю. Состав аэрозоля в приземном слое морской атмосферы подвержен влиянию водо-воздушного газового обмена, а также морского спрея и других привнесенных аэрозольных составляющих [9]. Как отмечается в [10], роль аэрозоля в климатических изменениях все еще остается неопределенной, хотя их влияние на приходящую и уходящую радиацию вполне ясно. Вместе с тем, пространственная и временная изменчивость аэрозоля существенно осложняет процесс оценки их влияние. Одним из механизмов такой изменчивости аэрозоля является их гигроскопический рост в размерах из-за увлажнения под воздействием относительной влажности воздуха. Модельное исследование эффекта гигроскопического роста было проведено, в частности, в работах [11,12]. Вкратце изложим основные положения этой модели. Согласно указанной модели радиус аэрозольной частицы r и относительная влажность RH , далее обозначаемая как s связаны следующим выражением

$$r = r_0 \cdot f(s) \tag{1}$$

где: r_0 -радиус аэрозольной частицы при $RH = 80\%$; f -коэффициент влажностного роста, определяемый как

$$f(s) = \left[\frac{E-s}{F(1-s)} \right]^{1/3} \tag{2}$$

Значения E и F для разных типов берегового аэрозоля, характеризующихся специфической величиной r_0 приведены в таблице 1.

Таблица 1

Значения E и F для разных типов берегового аэрозоля

Тип аэрозоля	r_0 (мкм)	E	F	пределы	
1	нерастворимый тип аэрозоля	0,03	-	-	
2	растворимый тип (сельский) аэрозоля	0,24	1,17	1,87	$s < 0,99$
3	растворимый тип (городской) аэрозоля	0,24	1,28	2,41	$s < 0,99$
4	соль+вода	2	1,83	5,13	$s < 0,9999$
5	соль+вода	10	1,97	5,83	$s < 0,999$

Составлено авторами

Дальнейше развитие модели гигроскопического роста берегового аэрозоля

Рассмотрим возможность дальнейшего развития вышеприведенной модели (1) и (2) гигроскопического роста берегового аэрозоля.

Из выражения (1) получим

$$r_0 = \frac{r}{f(s)} \quad (3)$$

Из (3) напишем

$$r_0^3 = \frac{r^3}{f(s)^3} \quad (4)$$

С учетом (2) и (4) получим

$$r_0^3 = \frac{r^3 F(1-s)}{E-s} \quad (5)$$

Из выражения (5) находим

$$E \cdot r_0^3 - s \cdot r_0^3 = r^3 F - r^3 s F \quad (6)$$

Из (6) окончательно получим:

$$s = \frac{r^3 F - E r_0^3}{r^3 F - r_0^3} \quad (7)$$

Как было отмечено выше, согласно известной модели гигроскопического роста берегового аэрозоля, при $s = 0,8$ имеем

$$r = r_0 \quad (8)$$

Следовательно, из (7) и (8) получим

$$0,8 = \frac{r^3 F - E r_0^3}{r^3 F - r_0^3} \quad (9)$$

Упростив выражение (9) запишем

$$0,8 = \frac{F-E}{F-1} \quad (10)$$

Полученное выражение (10) позволяет определить связь между коэффициентами E и F . Из (10) получим

$$0,8F - 0,8 = F - E \quad (11)$$

Из (11) окончательно находим

$$0,2F = E - 0,8$$

или

$$F = 5E - 4 \quad (12)$$

Таким образом, выясняется, что коэффициенты E и F будучи зависимыми от r_0 , т.е. различными для различных типов берегового аэрозоля, в то же время жестко связаны уравнением (12).

Значимость полученного выражения (12) заключается в следующем:

1) Для любого неизвестного типа берегового аэрозоля задав $RH = s = s_0$, где $s_0 \neq 0,8$, а также измерив радиус частиц $r_{\text{ОИЗМ}}$ можно определить F или E используя (12), на базе выражения (7).

2) Определив E и F используя данные, приведенные в табл. 1 можно определить тип берегового аэрозоля.

Изложим математически вышеприведенный пункт 1. Допустим, что в результате проведенного экспериментального исследования, при $RH = s_0$; $s_0 \neq 0,8$; измеренная величина радиуса аэрозоля составила $r_{\text{ОИЗМ}}$.

В соответствии с выражением (7) напомним

$$s_0 = \frac{r_{\text{ОИЗМ}}^3 F - E r_0^3}{r_{\text{ИЗМ}}^3 F - r_0^3} \quad (13)$$

С учетом (12) и (13) напомним

$$s_0 = \frac{r_{\text{ОИЗМ}}^3 (5E - 4) - E r_0^3}{r_{\text{ИЗМ}}^3 (5E - 4) - r_0^3} \quad (14)$$

Из (14) получим

$$s_0 \cdot r_{\text{ОИЗМ}}^3 (5E - 4) - r_0^3 s_0 = r_{\text{ОИЗМ}}^3 (5E - 4) - E r_0^3 \quad (15)$$

Из (15) находим

$$E r_0^3 + 5E (s_0 \cdot r_{\text{ОИЗМ}}^3 - r_{\text{ОИЗМ}}^3) = 4s_0 r_{\text{ОИЗМ}}^3 + r_0^3 s_0 - 4r_{\text{ОИЗМ}}^3 \quad (16)$$

Из (16) получим

$$E [r_0^3 + 5(s_0 \cdot r_{\text{ОИЗМ}}^3 - r_{\text{ОИЗМ}}^3)] = 4s_0 r_{\text{ОИЗМ}}^3 + r_0^3 s_0 - 4r_{\text{ОИЗМ}}^3 \quad (17)$$

Из (17) окончательно получаем

$$E = \frac{4s_0 r_{\text{ОИЗМ}}^3 + r_0^3 s_0 - 4r_{\text{ОИЗМ}}^3}{r_0^3 + 5(s_0 \cdot r_{\text{ОИЗМ}}^3 - r_{\text{ОИЗМ}}^3)} = \frac{r_0^3 s_0 + 4(s_0 r_{\text{ОИЗМ}}^3 - r_{\text{ОИЗМ}}^3)}{r_0^3 + 5(s_0 \cdot r_{\text{ОИЗМ}}^3 - r_{\text{ОИЗМ}}^3)} \quad (18)$$

Таким образом, предлагаемая методика определения типа берегового аэрозоля заключается в следующем:

1. Проводятся экспериментальные исследования роста радиуса аэрозольной частицы при $RH = s_0$. Результат обозначим как $r_{\text{ОИЗМ}}$.

2. Используя выражение (18) вычисляется зависимость E от r_0 , т.е. функция

$$E = \varphi(r_0) \quad (19)$$

3. Используя систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} F &= 5E - 4 \\ E &= \varphi(r_0) \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

а также данные, приведенные в табл. 1. определяется тип берегового аэрозоля, для которого система уравнений (20) выполняется наиболее точно.

Модельные исследования

Модельные исследования проводятся в двух этапах:

Этап 1. Проверка достоверности полученного выражения (12). В таблице 2 приведены значения E и F показанные в таблице 1, а также вычисленные по выражению (12) значения F , обозначенные как F_b .

Таблица 2

Сравнение известных и вычисленных значений F

Тип аэрозоля	E	F	F_b
1	-	-	-
2	1,17	1,87	1,85
3	1,28	2,41	2,4
4	1,83	5,13	5,15
5	1,97	5,83	5,85

Составлено авторами

Как видно из данных, приведенных в таблице 2 известные и вычисленные значения F совпадают с высокой точностью ($\pm 0,5\%$).

Этап 2. Проверка достоверности предлагаемой методики определения типа берегового аэрозоля. Допустим, что в результате экспериментальных исследований при $RH = s_0 = 0,4$ получено значение $r_{0изм} = 0,12$.

Вычислим величину E по формуле (18). Имеем

$$E = \frac{r_0^3 \cdot 0,4 + 4(0,4 \cdot 0,0017 - 0,0017)}{r_0^3 + 5(0,4 \cdot 0,0017 - 0,0017)} = \frac{r_0^3 \cdot 0,4 + 4(-0,6 \cdot 0,0017)}{r_0^3 + 5(-0,6 \cdot 0,0017)} = \frac{r_0^3 \cdot 0,4 - 0,00408}{r_0^3 - 0,0051} \quad (21)$$

Из (21) имеем:

$$E \cdot r_0^3 - E \cdot 0,0051 = r_0^3 \cdot 0,4 - 0,00408 \quad (22)$$

Из (22) находим

$$\begin{aligned} r_0^3(E - 0,4) &= E \cdot 0,0051 - 0,00408 \\ r_0^3 &= \frac{E \cdot 0,0051 - 0,00408}{E - 0,4} \\ r_0 &= \sqrt[3]{\frac{E \cdot 0,0051 - 0,00408}{E - 0,4}} \end{aligned} \quad (23)$$

В таблице 3 приведены значения r_0 вычисленные для значений $E = 1; 1,5; 2$; а также значения F вычисленные по выражению (12), а также значения r_0^3 .

Таблице 3

Вычисленные значения r_0^3 , обозначенные как r_{0b}^3 при разных значениях E и F

E	F	r_{0b}^3	r_0^3 при разных значениях E и F
1	1	0,0017	0,0137; $E=1,17$; $F=1,87$
1,5	3,5	0,00324	8 при $E=1,83$; $F=5,13$
2	6	0,00383	1000 при $E=1,97$; $F=5,83$

Составлено авторами

Как видно из данных приведенных на таблице 3 наиболее правдоподобный результат представлен на первой строке, где r_{0b}^3 и r_0^3 наиболее близки, где значения E и F в таблице 3 наиболее близки к аналогичным данным, показанным во второй строке таблицы 1. Так как $r_{0изм} = 0,12$ при $s = 0,4$, что также соответствует данным во второй строке табл. 1, результат модельного исследования на этапе 2 можно считать положительным.

Выводы

На основе известней модели гигроскопического роста берегового аэрозоля создана общая модель аналогичного назначения. Уточнены межсвязи между вспомогательными переменными, используемыми в известной модели. Проведенные модельные исследования подтвердили работоспособность предложенной методики определения типа берегового аэрозоля с использованием результатов измерения размера аэрозольной частицы при заданной величине RH .

Литература

1. Jin X., Wang Y., Li Z., Zhang F., Xu W., Sun Y., Fan X., Chen G., Wu H., Ren J., Wang Q. Significant contribution of organics to aerosol liquid water content in winter in Beijing, China// Atmos. Chem. Phys. 20 (2). 901-914. 2020
2. Kuang Y., Zhao C. S., Tao J. C., Bian Y. X., Ma N. E. Impact of aerosol hygroscopic growth on the direct aerosol radiative effect in summer on North China plain// Atmos. Environ. 147. 224-233. 2016
3. Zieger P., Vaisanen O., Corbin J. C., Partridge D. G., Bastelberger S., Mousavi-Fard M., Rosati B., Gysel M., Krieger U. K., Leck C., Nenes A., Riipinen I., Virtanen A., Salter M. E. Revising the hygroscopicity of inorganic sea salt particles// Nat. Commun. 8. 15883. 2017. <https://doi.org/10.1038/ncomms15883>
4. Zhang Y., Du W., Wang Y., Wang Q., Wang H., Zheng H., Zhang F., Shi H., Bian Y., Han Y., Fu P., Canonaco F., Prevora A. S. H., Zhu T., Wang P., Li Z., Sun Y. Aerosol chemistry and particle growth events at an urban downwind site in the North China Plain// Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2018. <https://doi.org/10.5194/acp-2017-889>
5. Fan J., Rosenfeld D., Zhang Y., Giangrande S. E., Li Z. Substantial convection and precipitation enhancements by ultrafine aerosol particles// Science 359. 411-418. 2018. <https://doi.org/10.1126/science.aan8461>

6. Wang Q., Sun Y. Characterization of aerosol hygroscopicity mixing state and CCN activity at a suburban site in the central North China plain// *Atmos. Chem. Phys.* 18. 11739-11752. 2018. <https://doi.org/10.5194/acp-18-11739-2018>
7. Gantt B., Kelly J. T., Bash J. O. Updating sea spray aerosol emissions in the community multiscale air quality (CMAQ) model version 5.0.2// *Geosci. Model Dev.* 8. 3733-3746. 2015. www.geosci-model-dev.net/8/3733/2015/doi:10.5194/gmd-8-3733-2015
8. Zielinski T. Studies of aerosol physical properties in coastal areas// *Aerosol Science and Technology.* 38:513-524. 2004. doi:10.1080/02786820490466738
9. Zielinski T., Ponczkowska A. Preliminary studies of aerosol composition in coastal areas// *Full Length Research Paper.* Vol. 2 (7). Pp. 259-262. July 2007
10. Harilal B. M., Sangekar N., Lotliker A., Moorthy K. K., Vethamony P. Aerosol optical thickness and spatial variability along coastal and off shore waters of the eastern Arabian Sea// *Journal of Marine Science.* 2011. 68(4). 745-750. doi:10.1093/icesjms/fsq191
11. Fitzgerald J. W. Approximation formulas for the equilibrium size of an aerosol particle as a function of its dry size and composition and ambient relative humidity// *Journal of Applied Meteorology.* 14(6). 1044-1049. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1975\)014<1044:afftes>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1975)014<1044:afftes>2.0.co;2)
12. Goroch A. K., Fairall C. W., Davidsom K. L. Modeling wind speed dependence of marine aerosol distribution by a gamma function// *Journal of Applied Meteorology.* 21. 666-671. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1982\)0212.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1982)0212.0.CO;2)

**R. O. G.
Huseynova,
B. M. Azizov,
H. S. Khalilova**

***Generalized model of the process of humidity
growth of aerosol of coastal zones.
Methodology for determining the type of
coastal aerosol***

National Academy of Aviation, Baku, Republic of Azerbaijan
e-mail: asadzade@rambler.ru

Abstract. *The possibility of modeling the process of geometric growth of the size of the coastal aerosol as a result of humidification is considered. Based on the well-known model of coastal aerosol humidification, a general model of a similar purpose has been developed. The relationships between auxiliary variables used in the known model are clarified. The efficiency of the proposed method for determining the type of coastal aerosol is confirmed by the results of the conducted model studies. using the measurement of the size of an aerosol particle at a given RH value.*

Keywords: *coastal aerosol, humidification, hygroscopic growth, optical thickness, modeling.*

References

1. Jin X., Wang Y., Li Z., Zhang F., Xu W., Sun Y., Fan X., Chen G., Wu H., Ren J., Wang Q. Significant contribution of organics to aerosol liquid water content in winter in Beijing, China// *Atmos. Chem. Phys.* 20 (2). 901-914. 2020. (in English)

2. Kuang Y., Zhao C. S., Tao J. C., Bian Y. X., Ma N. E. Impact of aerosol hygroscopic growth on the direct aerosol radiative effect in summer on North China plain// *Atmos. Environ.* 147. 224-233. 2016. (in English)
3. Zieger P., Vaisanen O., Corbin J. C., Partridge D. G., Bastelberger S., Mousavi-Fard M., Rosati B., Gysel M., Krieger U. K., Leck C., Nenes A., Riipinen I., Virtanen A., Salter M. E. Revising the hygroscopicity of inorganic sea salt particles// *Nat. Commun.* 8. 15883. 2017. <https://doi.org/10.1038/ncomms15883>. (in English)
4. Zhang Y., Du W., Wang Y., Wang Q., Wang H., Zheng H., Zhang F., Shi H., Bian Y., Han Y., Fu P., Canonaco F., Prevora A. S. H., Zhu T., Wang P., Li Z., Sun Y. Aerosol chemistry and particle growth events at an urban downwind site in the North China Plain// *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 2018. <https://doi.org/10.5194/acp-2017-889>. (in English)
5. Fan J., Rosenfeld D., Zhang Y., Giangrande S. E., Li Z. Substantial convection and precipitation enhancements by ultrafine aerosol particles// *Science* 359. 411-418. 2018. <https://doi.org/10.1126/science.aan8461>. (in English)
6. Wang Q., Sun Y. Characterization of aerosol hygroscopicity mixing state and CCN activity at a suburban site in the central North China plain// *Atmos. Chem. Phys.* 18. 11739-11752. 2018. <https://doi.org/10.5194/acp-18-11739-2018>. (in English)
7. Gantt B., Kelly J. T., Bash J. O. Updating sea spray aerosol emissions in the community multiscale air quality (CMAQ) model version 5.0.2// *Geosci. Model Dev.* 8. 3733-3746. 2015. www.geosci-model-dev.net/8/3733/2015/doi:10.5194/gmd-8-3733-2015. (in English)
8. Zielinski T. Studies of aerosol physical properties in coastal areas// *Aerosol Science and Technology*. 38:513-524. 2004. doi:10.1080/02786820490466738. (in English)
9. Zielinski T., Ponczkowska A. Preliminary studies of aerosol composition in coastal areas// *Full Length Research Paper*. Vol. 2 (7). Pp. 259-262. July 2007. (in English)
10. Harilal B. M., Sangekar N., Lotliker A., Moorthy K. K., Vethamony P. Aerosol optical thickness and spatial variability along coastal and off shore waters of the eastern Arabian Sea// *Journal of Marine Science*. 2011. 68(4). 745-750. doi:10.1093/icesjms/fsq191. (in English)
11. Fitzgerald J. W. Approximation formulas for the equilibrium size of an aerosol particle as a function of its dry size and composition and ambient relative humidity// *Journal of Applied Meteorology*. 14(6). 1044-1049. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1975\)014<1044:afftes>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1975)014<1044:afftes>2.0.co;2). (in English)
12. Goroch A. K., Fairall C. W., Davidsom K. L. Modeling wind speed dependence of marine aerosol distribution by a gamma function// *Journal of Applied Meteorology*. 21. 666-671. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1982\)0212.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1982)0212.0.CO;2). (in English)

Поступила в редакцию 20.10.2022 г.