

УДК 502.07:51-7

ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ НАЗЕМНЫХ СЕТЕЙ АЭРОЗОЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В БЕРЕГОВЫХ ЗОНАХ В УСЛОВИЯХ ВЕТРА

Халилова Хадиджа Сабир гызы¹,
e-mail: x.xalilova@mail.ru,

Гусейнова Рена Омар гызы²,
канд. техн. наук, доцент,
e-mail: renahuseynova55@gmail.com,

¹Национальная академия авиации, г. Баку, Азербайджанская Республика

²Азербайджанский университет архитектуры и строительства, г. Баку, Азербайджанская Республика

Статья посвящена вопросам построения наземных сетей сбора информации об аэрозольном загрязнении береговых зон с учетом скорости ветра с моря на берег. Методология проведения исследования предусматривает учет следующих основных воздействующих факторов береговой зоны: скорость ветра в направлении «море – берег», расстояние от берега, экспоненциальное уменьшение оптической толщины берегового морского аэрозоля при удалении от береговой линии к суше. В статье сформулирована и решена оптимизационная задача по выбору расстояния удаленности места расположения фотометра в зависимости от скорости ветра. Дана формула для вычисления удаленности от береговой линии, при которой средняя величина измерительного сигнала по некоторому диапазону допустимых скоростей ветров достигает минимальной величины. Основным выводом проведенного исследования является установленный факт о наличии оптимальных соотношений внешних факторов, которые должны быть учтены при построении и использовании технических средств сбора информации и контроля состояния атмосферы в прибрежных зонах. Полученные результаты могут быть применены при построении метеорологических сетей и станций для контроля загрязнения атмосферы в прибрежных зонах.

Ключевые слова: сбор информации, аэрозольные измерения, атмосфера, прибрежные зоны, оптимизационная задача, береговые сети фотометрических измерителей

ISSUES OF CONSTRUCTING GROUND-BASED NETWORKS OF AEROSOL MEASUREMENTS IN COASTAL ZONES UNDER WIND CONDITIONS

Khalilova H.S.¹,
e-mail: x.xalilova@mail.ru,

Huseynova R.O.²,
candidate of technical sciences, associate professor,
e-mail: renahuseynova55@gmail.com,

¹National Academy of Aviation, Baku, Republic of Azerbaijan

²Azerbaijan University of Architecture and Construction, Baku, Republic of Azerbaijan

The article is devoted to the issues of building ground-based networks for collecting information about aerosol pollution of coastal zones, taking into account the wind speed from sea to shore. The methodology of the study provides for taking into account the following main influencing factors of the coastal zone: wind speed in the “sea-shore” direction, distance from the shore, exponential decrease in the optical thickness of the coastal sea aerosol at a distance from the coastline to the land. The optimization problem of choosing the distance of the location of the photometer depending on the wind speed is formulated and solved in the article. A formula is given for calculating the distance from the coastline at which the average value of the measuring signal over a certain range of permissible wind speeds reaches a minimum value. The main conclusion of the study is the established fact that there are optimal ratios of influencing factors of the coastal zone, which should be taken

into account when constructing and using technical means of collecting information and monitoring the state of the atmosphere in coastal zones. The results obtained can be applied in the construction of meteorological networks and stations for monitoring atmospheric pollution in coastal zones.

Keywords: information collection, aerosol measurements, atmosphere, coastal zones, optimization problem, coastal networks of photometric meters

DOI 10.21777/2500-2112-2023-1-108-115

Введение

Аэрозольная загрязненность береговых территорий неизменно влияет как на радиационный баланс, так и на климат крупных городских зон. Вместе с тем, существующие модели аэрозоля часто не учитывают временную изменчивость аэрозольной нагрузки атмосферы береговых урбанизированных зон. Например, согласно [1], расчеты оптической толщины аэрозоля в Пекине при различных уровнях видимости приводили к погрешностям полученных оценок от +65 % до –35 % вычисленных по методике LOWTRAN7. Результаты экспериментальных измерений оптической радиации на длине волны 500 нм также привели к оценкам оптической толщины аэрозоля над городом Валенсия, отличающимся от результатов расчетов, проведенных по методике LOWTRAN7. Указанные факты, возможно, являются результатом как неадекватности моделей аэрозоля, используемых при расчетах, так и несовершенства используемых технических средств и методик проводимых измерений. Современные методики, предназначенные для применения в различных природных и географических средах, должны учитывать все природные факторы, способные оказать значительное внешнее воздействие на результаты проводимых измерений. Одним из таких факторов для береговых зон является ветер. С учетом изложенного, оптимизация береговых сетей фотометрических измерителей для сбора информации о степени аэрозольного загрязнения атмосферы с учетом воздействия ветров является актуальной научной задачей.

1. Изменчивость аэрозольной обстановки в береговых территориях

Изменчивость аэрозольной обстановки в береговых территориях в основном может быть объяснена изменчивостью ветренной обстановки в этой зоне. Морской аэрозоль, сгенерированный под воздействием ветров, суммируется с континентальным аэрозолем природного или антропогенного происхождения. При этом под воздействием влажности воздуха происходит увлажнение аэрозолей, в результате чего размеры аэрозольных частиц могут увеличиваться почти на порядок. В общем случае, в диапазоне видимых длин волн оптическая толщина аэрозоля определяется по формуле (1)

$$\tau_T = \tau_R + \tau_a + \tau_O + \tau_N, \quad (1)$$

где τ_R – оптическая толщина рэлеевского рассеяния;

τ_a – оптическая толщина аэрозоля;

τ_O и τ_N – оптические толщины O_3 и NO_2 .

При этом оптическая толщина атмосферы определяется на основе закона Бугера – Ламберта – Бера согласно формуле (2)

$$E = \frac{E_0 \exp(-\tau_T m)}{R^2}, \quad (2)$$

где R – среднее расстояние от Земли до Солнца;

E_0 – солнечный поток радиации на верхней границе атмосферы;

E – измеренная величина солнечного оптического излучения на уровне Земли;

m – оптическая воздушная масса.

При этом измеренные значения солнечной оптической радиации в пределах урбанизированных и периферийных зон резко отличаются, что иллюстрируется на рисунке 1.

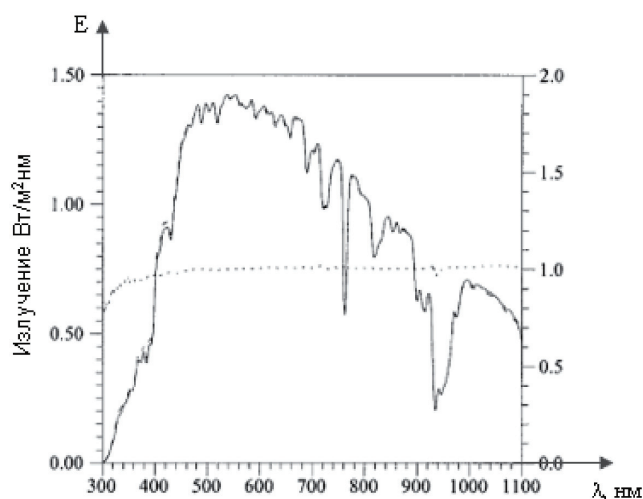


Рисунок 1 – Измеренные значения прямой солнечной радиации в г. Валенсия в центре города (сплошная линия) и на периферии (пунктир) [1]

На рисунке 1 приняты следующие обозначения: λ – длина волны проводимых измерений, нм.

Что касается выбора средства аэрозольных измерений и наиболее информативного параметра, то согласно [2–5] наиболее информативным параметром следует считать коэффициент аэрозольного ослабления. Такой вывод вполне может быть обоснован тем, что существующие типы солнечных фотометров, такие как CIMEL, PFR, SPO1A, MFRSR и соответствующие методики измерений дают значительный разброс результатов измерения показателя Ангстрема, что иллюстрируется на рисунке 2 [6].

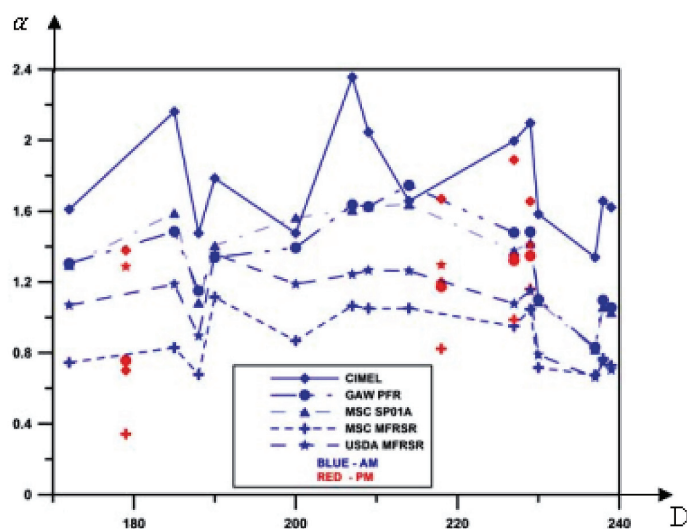


Рисунок 2 – Значения показателя Ангстрема, измеренные различными типами солнечных фотометров

Принятые обозначения на рисунке 2: D – дни года; α – показатель Ангстрема.

Как видно из графиков, приведенных на рисунке 2, сезонные приращения значения показателя α значительно ниже разброса показаний указанных типов фотометров. По этой причине при проведении солнечно-фотометрических аэрозольных измерений наиболее информативным параметром, позволяющим учесть изменение аэрозольной обстановки, следует считать коэффициент аэрозольного ослабления.

Далее, в настоящей статье рассматривается вопрос об условиях оптимального построения фотометрических измерительных сетей для сбора информации о степени аэрозольного загрязнения атмосферы с учетом следующих основных воздействующих факторов береговой зоны:

- 1) скорость ветра в направлении «море – берег»;
- 2) расстояние от берега.

2. Методика исследования

Прежде всего, рассмотрим результаты воздействия ветра в направлении «море – берег» на измеряемую величину концентрации аэрозольных частиц. Исследования, проведенные в [7], показали, что концентрация аэрозольных частиц с диаметром более 0,5 мкм растет по экспоненциальному закону в зависимости от скорости ветра.

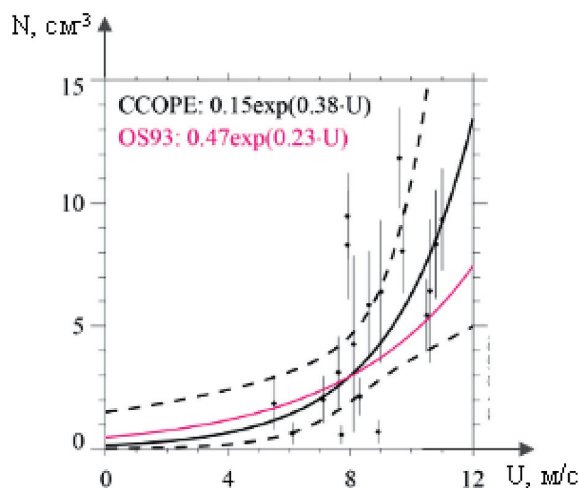


Рисунок 3 – Кривые зависимости концентрации аэрозольных частиц размером более 0,5 мкм от скорости ветра

На рисунке 3 приняты следующие обозначения: U – скорость ветра; N – концентрация аэрозольных частиц диаметром более 0,5 мкм; пунктиром показаны границы области 95 % доверительного интервала.

В общем случае морской аэрозоль в зависимости от направленности ветра усиливает или ослабляет аэрозольную загрязненность береговых зон, так как при отсутствии осадков время живучести аэрозоля в береговой зоне может быть вычислено по выражению

$$N = 0,15 \exp(0,38U), \quad (3)$$

где U – скорость ветра.

Что касается зависимости коэффициента ослабления берегового аэрозоля от расстояния до берега, то согласно [8], указанная зависимость также имеет экспоненциальный характер, что показано на рисунке 4. Согласно [8], указанная зависимость имеет вид:

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp\left(-\frac{D}{D_{ff}}\right), \quad (4)$$

где τ_0 – коэффициент ослабления при $D = 0$;

τ – коэффициент ослабления при расстоянии D до берега;

D_{ff} – расстояние, где τ_0 уменьшается в e раз.

В общем случае, оптическая толщина $\tau_a(\lambda)$ атмосферного аэрозоля может быть вычислена согласно формуле Ангстрема

$$\tau_a(\lambda) = \beta \cdot \lambda^{-\alpha}, \quad (5)$$

где β – коэффициент аэрозольной мутности атмосферы;

λ – длина волны измерений;
 α – показатель Ангстрема.

Кривые изменения измеренных значений коэффициента ослабления аэрозоля в зависимости от расстояния до береговой линии и в зависимости от высоты местности проводимых измерений показаны на рисунке 4.

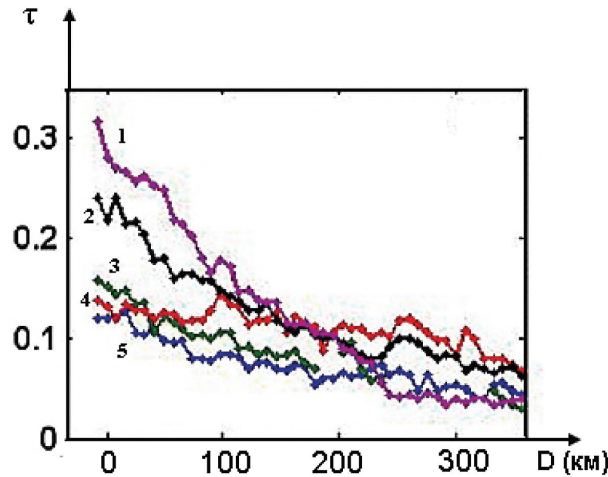


Рисунок 4 – Кривые изменения измеренных значений коэффициента ослабления аэрозоля в зависимости от расстояния до береговой линии и высоты местности проводимых измерений

Принятые обозначения на рисунке 4: τ – коэффициент ослабления аэрозоля (км^{-1}); D – расстояние до берега (км); 1 – на высоте 0,5 км, 2 – на высоте 1 км, 3 – на высоте 2 км, 4 – на высоте 3 км, 5 – на высоте 4 км.

Для дальнейшего модельного анализа условий оптимального построения сети аэрозольных измерений в береговой зоне примем следующие упрощающие условия:

1. Измерения проводятся в береговой зоне, где в отношении α аэрозольная масса гомогенна.
2. Концентрация аэрозольных частиц (N) прямо пропорциональна показателю β ; т.е.

$$\beta = c_1 \cdot N . \quad (6)$$

3. В береговой зоне континентальный аэрозоль отсутствует.

С учетом (3), (5) и (6) получим

$$\tau_a(\lambda) = c_1 \cdot 0,15 \exp(0,38U) \lambda^{-\alpha} . \quad (7)$$

Учитывая $\tau_0 = \tau_a(\lambda)$, из (4) и (7) получим

$$\tau = c_1 \cdot 0,15 \exp(0,38U) \lambda^{-\alpha} \cdot \exp\left(-\frac{D}{D_{ff}}\right) . \quad (8)$$

Среднеинтегральную величину τ , усредненную по всевозможным значениям U , определим по формуле

$$\tau_{cp} = \frac{1}{U_m} \int_0^{U_m} C_0 \exp(0,38U) \cdot \exp\left(-\frac{D}{D_{ff}}\right) dU, \quad (9)$$

где функция (9) физически означает выбор расстояния точки измерения в зависимости от скорости ветра в направлении «море – суша». Для вычисления оптимальной функции $f(U)$, приводящей τ_{cp} к экстремальной величине, на функцию $f(U)$ наложим следующее ограничительное условие

$$\int_0^{U_m} f(U) dU = c_2; \quad c_2 = const . \quad (10)$$

С учетом (8), (9), (10) целевой функционал оптимизации составим в следующем виде:

$$\tau_{cp} = \frac{1}{U_m} \int_0^{U_m} C_0 \exp(0,38U) \cdot \exp\left(-\frac{f(U)}{D_{0,ff}}\right) dD + L \left[\int_0^{U_m} f(U) dU - c_2 \right], \quad (11)$$

где L – множитель Лагранжа.

Согласно (6), решение оптимизационной задачи (11) должно удовлетворять условию

$$d \left\{ \frac{C_0}{U_m} \exp(0,38U) \cdot \exp\left(-\frac{f(U)}{D_{0,ff}}\right) + Lf(U) \right\} \frac{dU}{df(U)} = 0. \quad (12)$$

Из (12) получаем

$$\frac{C_0}{U_m} \exp(0,38U) \cdot \exp\left(-\frac{1}{D_{0,ff}}\right) \cdot \exp\left(-\frac{f(U)}{D_{0,ff}}\right) + L = 0. \quad (13)$$

Из (13) находим

$$\exp(0,38U) = -L \cdot \exp\left(\frac{f(U)}{D_{0,ff}}\right) \cdot \frac{D_{0,ff} U_m}{C_0}. \quad (14)$$

Логарифмируя (14), получим

$$0,38U = \ln\left(\frac{L \cdot D_{0,ff} U_m}{C_0}\right) + \frac{D_{0,ff}}{f(U)}. \quad (15)$$

Из (15) находим

$$f(U) = \frac{D_{0,ff}}{0,38U - \ln\left(\frac{L \cdot D_{0,ff} U_m}{C_0}\right)}. \quad (16)$$

Таким образом, при зависимости D от U по выражению (16) целевой функционал (11) достигает экстремума. Анализ показывает, что этот экстремум является минимумом, так как повторная производная (13) по $f(U)$ оказывается положительной величиной.

Для вычисления значения λ воспользуемся выражениями (10) и (16). Имеем

$$\int_0^{U_m} \frac{D_{0,ff}}{0,38U - \ln\left(\frac{L \cdot D_{0,ff} U_m}{C_0}\right)} dU = c_2. \quad (17)$$

Из (17) можно получить следующее трансцендентное уравнение

$$c_3 = \ln \left[\frac{0,38U}{\ln \frac{c_0}{L \cdot D_{0,ff} U_m}} - \ln^2 \left(\frac{L \cdot D_{0,ff} U_m}{C_0} \right) \right], \quad (18)$$

где $c_3 = \frac{D_{0,ff}}{0,38}$.

Решение уравнения (18) относительно L отметим как L_0 . Следовательно, искомая функциональная зависимость $f(U)$ имеет вид

$$f(U) = \frac{D_{0,ff}}{0,38U - c_3}, \quad (19)$$

где $c_3 = \ln \left(\frac{L_0 D_{0,ff} U_m}{C_0} \right)$.

Практическая значимость полученного результата (19) заключается в том, что при построении береговых сетей фотометрических измерителей оптической толщины атмосферного аэрозоля следует избегать размещения фотометров на расстоянии от берега D_{pac} , рассчитываемого по выражению (19), т.к. в этом случае измерительный сигнал, получаемый с такого фотометра, будет иметь минимальное среднее значение.

Заключение

Проанализированы вопросы оптимального построения сети измерения аэрозольной загрязненности береговой зоны с учетом воздействия ветров. Также учтено экспоненциальное уменьшение оптической толщины берегового морского аэрозоля при удалении от береговой линии к суше. Сформулирована и решена оптимизационная задача по выбору расстояния удаленности места расположения фотометра в зависимости от скорости ветра. Дана формула для вычисления той удаленности от береговой линии, при которой средняя величина измерительного сигнала по некоторому диапазону допустимых скоростей ветров достигает минимальной величины.

Список литературы

1. *Martinez-Lozano J.A., Utrillas M.P., Tena F., Pedros R., Canada J., Bosca J. V., Lorente J.* Aerosol optical characteristics from a summer campaign in an urban coastal Mediterranean area // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – July 2001. – Vol. 39, No. 7. – P. 1573–1585.
2. *Lisenko S.A., Kugeiko M.M.* Regression approach to analyzing the informativity and interpretation of aerosol optical measurements // *Journal of Applied Spectroscopy*. – 2009. – Vol. 76, No. 6. – P. 826–832.
3. *Chen W., Tian H. and Qin K.* Black carbon aerosol in the industrial city of xuzhou, china: Temporal characteristics and source appointment, *Aerosol Air Qual. Res.*, 19. – 2019. – P. 794–811. – URL: <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.07.0245> (accessed: 10.02.2023). – Text: electronic.
4. *Fan X., Liu J., Zhang F., Chen L., Collins D., Xu W., Jin X., Ren J., Wang Y., Wu H., Li S., Sun Y. and Li Z.* Contrasting size-resolved hygroscopicity of fine particles derived by HTDMA and HR-ToF-AMS measurements between summer and winter in Beijing: the impacts of aerosol aging and local emissions, *Atmos. Chem. Phys.*, 20. – 2020. – P. 915–929. – URL: <https://doi.org/10.5194/acp-20-915-2020> (accessed: 10.02.2023). – Text: electronic.
5. *Shen C., Zhao G., Zhao W., Tian P. and Zhao C.* Measurement report: aerosol hygroscopic properties extended to 600 nm in the urban environment, *Atmos. Chem. Phys.*, 21. – 2021. – P. 1375–1388. – URL: <https://doi.org/10.5194/acp-21-1375-2021> (accessed: 10.02.2023). – Text: electronic.
6. *McArthur L.J.B., Halliwell D.H., Niebergall O.J., O'Neill N.T., Slusser J.S., Wehrli C.* Field comparison of network sun photometers // *Journal of geophysical research*. – 2003. – Vol. 108, No. 19. – P. 4596.
7. *Fults S.L., Massmann A.K., Montecinos A., Andrews E., Kingsmill D.E., Minder J.R., Garreaud R.D., Snider J.R.* Wintertime aerosol measurements during the Chilean Coastal Orographic precipitation experiment // *Atmos. Chem. Phys.* – 2019. – Vol. 19. – P. 12377–12396. – URL: <https://doi.org/10.5194/acp-19-12377-2019> (accessed: 10.02.2023). – Text: electronic.
8. *Satheesh S.K., Moorthy K.K., Babu S.S., Vinoy V., Nair V.S., Beegum S.N., Dutt C.B.S., Alappattu D.P., Kunhikrishnan P.K.* Vertical structure and horizontal gradients of aerosol extinction coefficients over coastal India inferred from airborne lidar measurements during the integrated campaign for aerosol, gases and radiation budget (ICARB) field campaign // *Journal of Geophysical Research*. – 2009. – Vol. 114. – DOI 10.1029/2008JD011033.

References

1. *Martinez-Lozano J.A., Utrillas M.P., Tena F., Pedros R., Canada J., Bosca J. V., Lorente J.* Aerosol optical characteristics from a summer campaign in an urban coastal Mediterranean area // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – July 2001. – Vol. 39, No. 7. – P. 1573–1585.
2. *Lisenko S.A., Kugeiko M.M.* Regression approach to analyzing the informativity and interpretation of aerosol optical measurements // *Journal of Applied Spectroscopy*. – 2009. – Vol. 76, No. 6. – P. 826–832.
3. *Chen W., Tian H. and Qin K.* Black carbon aerosol in the industrial city of xuzhou, china: Temporal characteristics and source appointment, *Aerosol Air Qual. Res.*, 19. – 2019. – P. 794–811. – URL: <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.07.0245> (accessed: 10.02.2023). – Text: electronic.
4. *Fan X., Liu J., Zhang F., Chen L., Collins D., Xu W., Jin X., Ren J., Wang Y., Wu H., Li S., Sun Y. and Li Z.* Contrasting size-resolved hygroscopicity of fine particles derived by HTDMA and HR-ToF-AMS measurements between summer and winter in Beijing: the impacts of aerosol aging and local emissions, *Atmos. Chem.*

- Phys., 20. – 2020. – P. 915–929. – URL: <https://doi.org/10.5194/acp-20-915-2020> (accessed: 10.02.2023). – Text: electronic.
5. *Shen C., Zhao G., Zhao W., Tian P. and Zhao C.* Measurement report: aerosol hygroscopic properties extended to 600 nm in the urban environment, *Atmos. Chem. Phys.*, 21. – 2021. – P. 1375–1388. – URL: <https://doi.org/10.5194/acp-21-1375-2021> (accessed: 10.02.2023). – Text: electronic.
6. *McArthur L.J.B., Halliwell D.H., Niebergall O.J., O'Neill N.T., Slusser J.S., Wehrli C.* Field comparison of network sun photometers // *Journal of geophysical research.* – 2003. – Vol. 108, No. 19. – P. 4596.
7. *Fulst S.L., Massmann A.K., Montecinos A., Andrews E., Kingsmill D.E., Minder J.R., Garreaud R.D., Snider J.R.* Wintertime aerosol measurements during the Chilean Coastal Orographic precipitation experiment // *Atmos. Chem. Phys.* – 2019. – Vol. 19. – P. 12377–12396. – URL: <https://doi.org/10.5194/acp-19-12377-2019> (accessed: 10.02.2023). – Text: electronic.
8. *Satheesh S.K., Moorthy K.K., Babu S.S., Vinoj V., Nair V.S., Beegum S.N., Dutt C.B.S., Alappattu D.P., Kunhikrishnan P.K.* Vertical structure and horizontal gradients of aerosol extinction coefficients over coastal India inferred from airborne lidar measurements during the integrated campaign for aerosol, gases and radiation budget (ICARB) field campaign // *Journal of Geophysical Research.* – 2009. – Vol. 114. – DOI 10.1029/2008JD011033.