



**Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН**

Лаборатория мониторинга парниковых газов

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ПРИЗЕМНОГО АЭРОЗОЛЯ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНСАМБЛЯ МОДЕЛЬНЫХ  
РЕАЛИЗАЦИЙ И УЧЁТОМ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ**

Зенкова П.Н., Антонов А.В., Панченко М.В.

Кисловодск - 2026

# ПРОБЛЕМА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ И ВРЕМЕННОЙ ВАРИАТИВНОСТИ В МОДЕЛИРОВАНИИ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АЭРОЗОЛЯ

Атмосферный аэрозоль — ключевой фактор радиационного баланса

Типичные неопределённости измерений:

**10–20%** — по распределению части по размерам [1], влажности частиц [2]

**2.5–4%** — по среднему косинусу индикатрисы рассеяния [3]

Цена упрощённого подхода (усреднение входных данных):

До **25%** систематической ошибки в расчёте радиационного потока [4, 5]

До **85%** разброса в прогнозируемых оптических характеристиках [5]

---

[1] Baibakov et al., Airborne and ground-based measurements of aerosol optical depth of freshly emitted anthropogenic plumes in the Athabasca Oil Sands Region. 2021

[2] Salamalikis et al., Ground-based validation of aerosol optical depth from CAMS reanalysis project: An uncertainty input on direct normal irradiance under cloud-free conditions. 2021

[3] Zhao et al., Calculating the aerosol asymmetry factor based on measurements from the humidified nephelometer system. 2018

[4] Zhang et al., Impact of measurement uncertainties on aerosol optical properties and radiative forcing estimates. 2019

[5] Telg et al., Aerosol optical properties calculated from size distribution measurements: An uncertainty study. 2023

# ТРАДИЦИОННЫЙ ПОДХОД И ЕГО НЕДОСТАТКИ

Схема метода:



В математике это выражается просто:  $f(\langle x \rangle) \neq \langle f(x) \rangle$

То, что мы считаем по средним значениям, систематически отличается от реального среднего результата!

- **Накопление ошибки:**

Погрешность может достигать 15–25% в расчётах радиационного воздействия [1]

- **Слепота к неопределенности:**

Невозможно рассчитать доверительный интервал — диапазон разброса неизвестен [2]

- **Потеря информации:**

Игнорируется временная изменчивость и нелинейные эффекты

---

[4] Zhang et al., Impact of measurement uncertainties on aerosol optical properties and radiative forcing estimates. 2019

[5] Telg et al., Aerosol optical properties calculated from size distribution measurements: An uncertainty study. 2023

# ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ

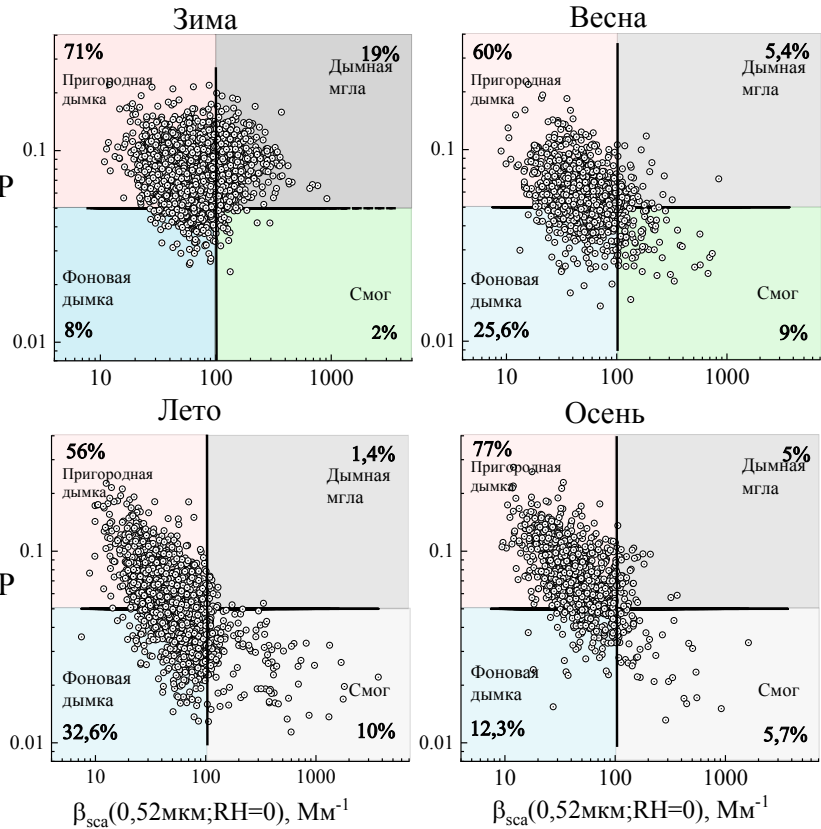
| Входной параметр                          | Инструментальная<br>неопределенность |
|-------------------------------------------|--------------------------------------|
| Коэффициент рассеяния<br>(ФАН-М)          | 10%                                  |
| Концентрация еВС<br>(аэталометр)          | 10%                                  |
| Относительная влажность                   | 10%                                  |
| Параметр<br>конденсационной<br>активности | 10–20%                               |
| Распределение еВС по<br>размерам          | 10–20%                               |

---

[1] Зенкова П. Н. Моделирование оптических характеристик аэрозоля ансамблем решений с учетом инструментальной неопределенности входных параметров. // Оптика атмосферы и океана. 2025.

[2] Zenkova P.N.et al., Analysis of sensitivity of the optical characteristics reconstructed by the model of tropospheric aerosol of Western Siberia to uncertainties in the initial data . 2023

ДАННЫЕ ИЗМЕРЕНИЙ ПО ТИПАМ АЭРОЗОЛЬНОЙ ПОГОДЫ



Распределение среднесуточных значений характеристик «сухой основы» аэрозоля на диаграмме  $\{\beta_{sca}(\lambda=0,52 \text{ мкм}; RH=0); P\}$  [1]

Table A1. Average values and root mean square(rms) deviations (in parentheses) of the atmospheric aerosol parameters.

| Season | Type of Aerosol Weather | Particle Size Distribution Function |                                                    |           |               |                    |           |               | Ratio of Angular Scattering Coefficients |                           |
|--------|-------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------|---------------|--------------------|-----------|---------------|------------------------------------------|---------------------------|
|        |                         | $r_{sub}, \mu\text{m}$              | After Correction by Angular Scattering Coefficient |           |               | Before Correction  |           |               | $N_d/N_c$                                | $I(20^\circ)/I(12^\circ)$ |
|        |                         |                                     | $r_c, \mu\text{m}$                                 | $\ln S_c$ | $V_d/V_{sub}$ | $r_c, \mu\text{m}$ | $\ln S_c$ | $V_d/V_{sub}$ |                                          |                           |
| Spring | Background              | 0.03 (0.003)                        | 3.8                                                | 0.95      | 0.18          | 3.25               | 0.68      | 0.04          | 68 (50)                                  | 0.068 (0.050)             |
|        | Haze-S                  | 0.039 (0.001)                       | 3.9                                                | 0.95      | 0.45          | 3.76               | 0.71      | 0.11          | 64 (51)                                  | 0.056 (0.040)             |
|        | Smoke haze              | 0.05 (0.006)                        | 4.1                                                | 0.95      | 0.38          | 3.79               | 0.84      | 0.10          | 97 (57)                                  | 0.116 (0.107)             |
|        | Smog                    | 0.036 (0.003)                       | 4.1                                                | 0.95      | 0.14          | 4.14               | 0.81      | 0.04          | 100 (43)                                 | 0.114 (0.072)             |
| Summer | Background              | 0.026 (0.005)                       | 3.5                                                | 0.90      | 0.12          | 3.24               | 0.64      | 0.024         | 60 (39)                                  | 0.053 (0.023)             |
|        | Haze-S                  | 0.032 (0.011)                       | 3.6                                                | 0.87      | 0.38          | 3.20               | 0.60      | 0.06          | 48 (34)                                  | 0.039 (0.016)             |
|        | Smoke haze              | 0.086 (0.012)                       | 3.3                                                | 0.90      | 0.16          | 2.53               | 0.62      | 0.313         | 93 (48)                                  | 0.172 (0.106)             |
|        | Smog                    | 0.042 (0.005)                       | 3.3                                                | 0.90      | 0.25          | 2.96               | 0.62      | 0.07          | 71 (33)                                  | 0.068 (0.047)             |
| Autumn | Background              | 0.042 (0.003)                       | 3.2                                                | 0.90      | 0.26          | 2.79               | 0.60      | 0.06          | 83 (70)                                  | 0.078 (0.035)             |
|        | Haze-S                  | 0.047 (0.007)                       | 3.4                                                | 0.90      | 0.48          | 3.09               | 0.63      | 0.15          | 75 (65)                                  | 0.066 (0.044)             |
|        | Smoke haze              | 0.102 (0.02)                        | 2.8                                                | 0.95      | 0.28          | 3.58               | 0.93      | 0.35          | 96 (72)                                  | 0.190 (0.078)             |
|        | Smog                    | 0.71 (0.011)                        | 3.2                                                | 0.90      | 0.55          | 3.24               | 0.66      | 0.29          | 78 (59)                                  | 0.101 (0.078)             |
| Winter | Background              | 0.035 (0.004)                       | 3.0                                                | 1.25      | 0.1           | 2.95               | 0.77      | 0.03          | 108 (86)                                 | 0.150 (0.068)             |
|        | Haze-S                  | 0.0435 (0.005)                      | 3.0                                                | 1.25      | 0.2           | 3.52               | 0.84      | 0.068         | 117 (128)                                | 0.135 (0.061)             |
|        | Smoke haze              | 0.043 (0.010)                       | 3.0                                                | 1.15      | 0.12          | 3.25               | 0.80      | 0.053         | 107 (45)                                 | 0.154 (0.062)             |
|        | Smog                    | 0.056 (0.008)                       | 3.1                                                | 1.3       | 0.19          | 3.61               | 0.93      | 0.094         | 131 (115)                                | 0.167 (0.047)             |

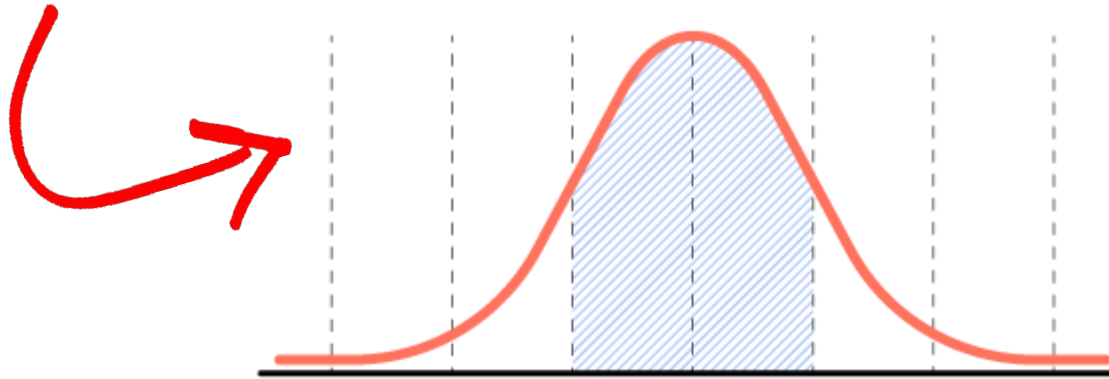
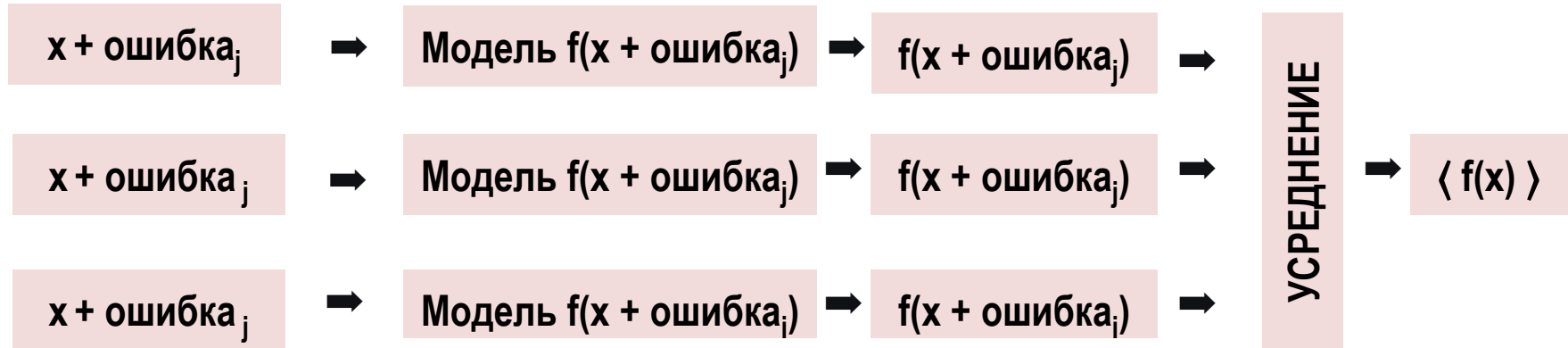
Table A2. Table A1 continued.

| Season | Type of Aerosol Weather | BC Size Distribution |             | Extinction Coefficients, $\text{Mm}^{-1}$ |                  |                  |                  |                 | $\alpha$    | B         | $\gamma$      |
|--------|-------------------------|----------------------|-------------|-------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------|-----------|---------------|
|        |                         | $D_{BC}, \text{nm}$  | $S_{BC}$    | $\lambda = 0.45$                          | $\lambda = 0.55$ | $\lambda = 0.69$ | $\lambda = 1.06$ | $\lambda = 3.9$ |             |           |               |
| Spring | Background              | 175 (18.5)           | 0.64 (0.16) | 204 (104)                                 | 159 (78)         | 122 (65)         | 93 (56)          | 69 (51)         | 1.07 (0.45) | 96 (56)   | 0.426 (0.12)  |
|        | Haze-S                  | 167 (16)             | 0.67 (0.13) | 227 (113)                                 | 180 (89)         | 140 (78)         | 114 (70)         | 89 (69)         | 1.00 (0.42) | 115 (71)  | 0.305 (0.14)  |
|        | Smoke haze              | 192 (3.2)            | 0.52 (0.05) | 367 (192)                                 | 281 (148)        | 204 (108)        | 128 (67)         | 78 (56)         | 1.14 (0.36) | 161 (79)  | 0.183 (0.040) |
|        | Smog                    | 175 (17.7)           | 0.56 (0.11) | 373 (145)                                 | 289 (114)        | 218 (92)         | 152 (79)         | 115 (79)        | 1.31 (0.41) | 138 (70)  | 0.130 (0.060) |
| Summer | Background              | 173 (18.1)           | 0.66 (0.12) | 202 (76)                                  | 166 (62)         | 124 (52)         | 95 (44)          | 64 (26)         | 1.02 (0.29) | 98 (45)   | 0.230 (0.12)  |
|        | Haze-S                  | 163 (14.4)           | 0.63 (0.11) | 213 (71)                                  | 172 (58)         | 134 (47)         | 106 (41)         | 76 (31)         | 0.90 (0.27) | 109 (41)  | 0.215 (0.10)  |
|        | Smoke haze              | 182 (20.4)           | 0.71 (0.10) | 336 (129)                                 | 268 (111)        | 192 (77)         | 135 (50)         | 82 (28)         | 1.15 (0.15) | 118 (28)  | 0.066 (0.060) |
|        | Smog                    | 170 (20.5)           | 0.72 (0.08) | 276 (46)                                  | 215 (36)         | 158 (21)         | 117 (32)         | 75 (15)         | 1.17 (0.32) | 139 (51)  | –             |
| Autumn | Background              | 169 (15.6)           | 0.65 (0.09) | 237 (113)                                 | 193 (85)         | 150 (69)         | 110 (62)         | 85 (44)         | 1.00 (0.38) | 116 (62)  | 0.305 (0.16)  |
|        | Haze-S                  | 168 (13.6)           | 0.61 (0.08) | 225 (113)                                 | 180 (90)         | 146 (73)         | 118 (64)         | 90 (46)         | 0.81 (0.40) | 122 (64)  | 0.302 (0.12)  |
|        | Smoke haze              | 178 (17.2)           | 0.74 (0.10) | 434 (308)                                 | 381 (295)        | 283 (221)        | 155 (92)         | 86 (34)         | 1.06 (0.33) | 175 (82)  | 0.203 (0.063) |
|        | Smog                    | 167 (36)             | 0.69 (0.15) | 386 (184)                                 | 310 (157)        | 238 (121)        | 164 (79)         | 110 (51)        | 1.21 (0.35) | 172 (108) | 0.222 (0.082) |
| Winter | Background              | 199 (24.8)           | 0.60 (0.15) | –                                         | –                | –                | –                | –               | –           | –         | 0.301 (0.11)  |
|        | Haze-S                  | 186 (24)             | 0.65 (0.15) | –                                         | –                | –                | –                | –               | –           | –         | 0.285 (0.11)  |
|        | Smoke haze              | 218 (7.10)           | 0.55 (0.05) | –                                         | –                | –                | –                | –               | –           | –         | 0.226 (0.061) |
|        | Smog                    | 188 (29)             | 0.67 (0.14) | –                                         | –                | –                | –                | –               | –           | –         | 0.216 (0.079) |

[1] Панченко М.В. и др. Распределение по размерам «сухой основы» частиц в приземном слое атмосферы пригородного района г. Томска в рамках эмпирической классификации типов «аэрозольной погоды». 2019.

[2] Panchenko M.V. et. all. Aerosol characteristics in the near-ground layer of the atmosphere of the city of Tomsk in different types of aerosol weather. 2020

# АНСАМБЛЕВЫЙ ПОДХОД



**Ключевой момент:**

**$\langle f(x) \rangle$**  — мы применяем функцию к каждому варианту входных данных, затем усредняем результаты

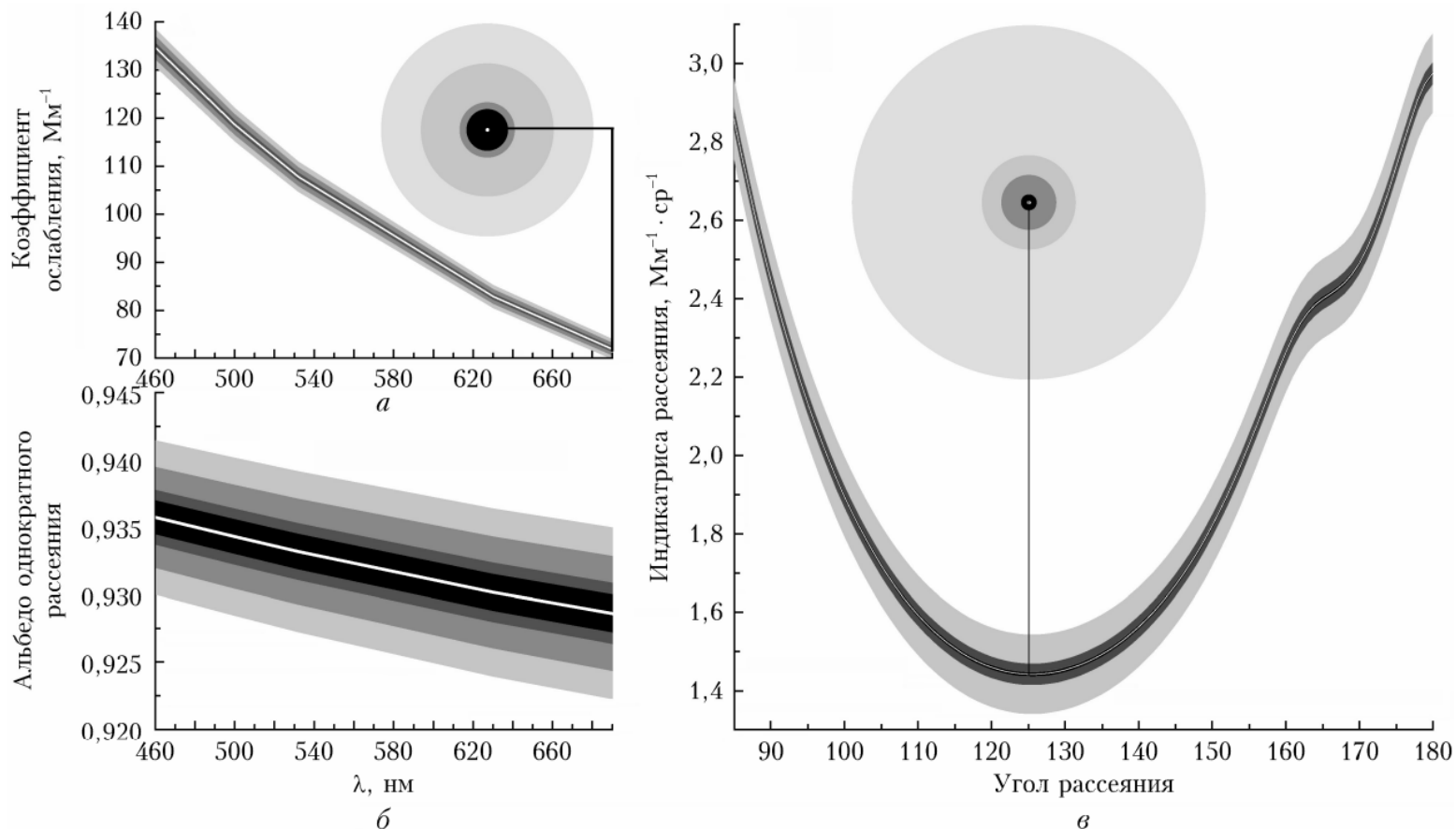
[1] Зенкова П. Н. Моделирование оптических характеристик аэрозоля ансамблем решений с учетом инструментальной неопределенности входных параметров . // Оптика атмосферы и океана. 2025.





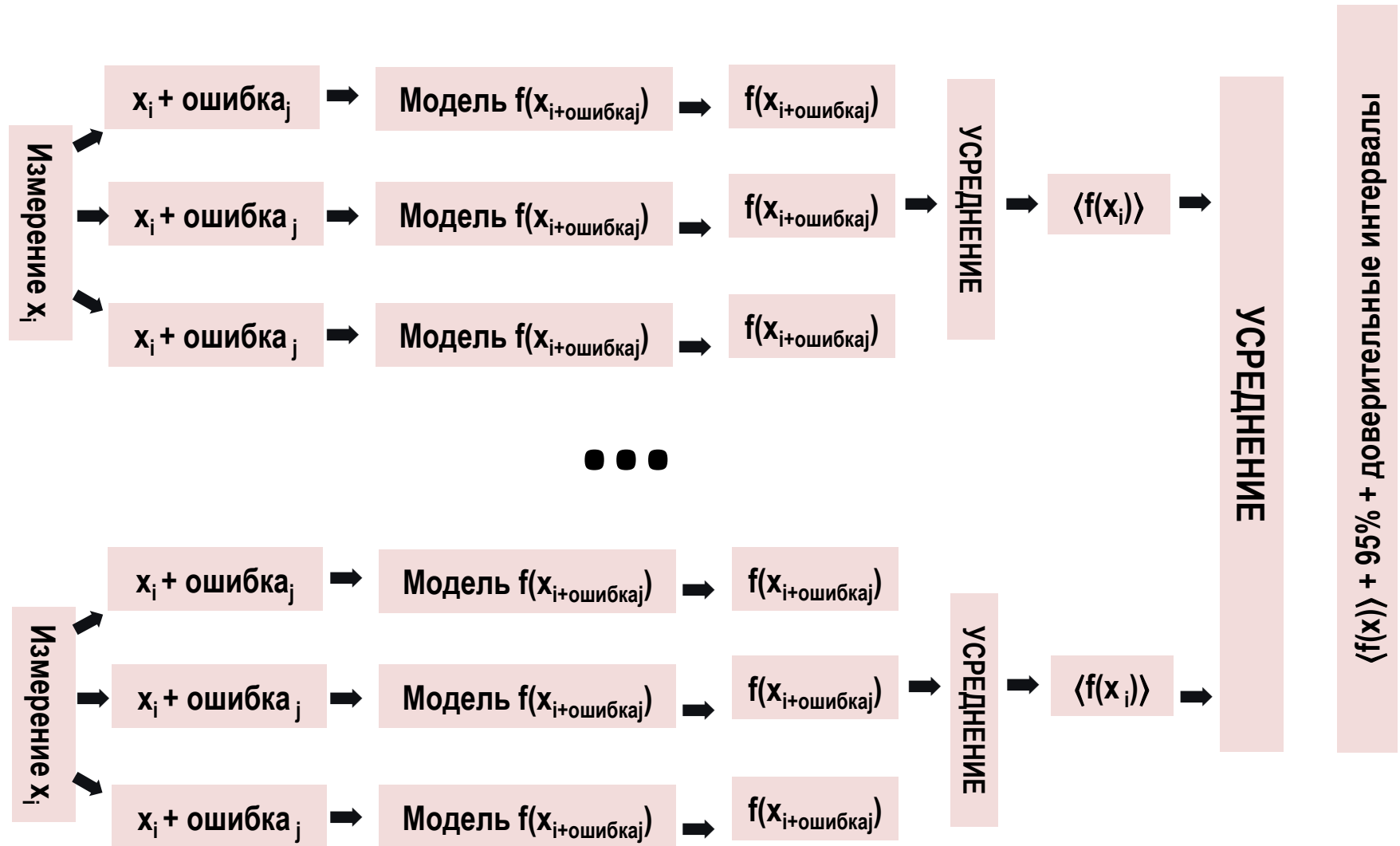


# АНСАМБЛЕВЫЙ ПОДХОД. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АЭРОЗОЛЯ



Модельный спектральный ход коэффициента ослабления (а) и альбе́до однократного рассеяния в диапазоне длин волн  $\lambda=460\div690\text{нм}$  (б), индикатриса рассеяния на длине воны = 530 нм (в) и 95% доверительные интервалы ансамблей из 50 (светло-серый), 100 (серый), 200 (темно-серый) и 1000 (черный) решений; эталонные значения выделены белым цветом

# АНСАМБЛЕВЫЙ ПОДХОД





# Заключение

Моделирование оптических характеристик аэрозоля с использованием ансамбля решений показало перспективность снижения неопределённости измерений параметров.

Систематическая ошибка коэффициента ослабления достигает 8%, альбедо однократного рассеяния 0.85% и сохраняется на всех длинах волн

Возможность адаптации для всех сезонов и типов аэрозолей

Работа была выполнена в рамках гранта РНФ № 25-27-00111