

# Развитие аэрозольной модели приземного слоя морской и прибрежной атмосферы

Г.А. Калошин\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 24.07.2017 г.

Представлена модель аэрозоля приземного слоя морской и прибрежной атмосферы MaexPro, основанная на долгосрочных наблюдениях распределения частиц в диапазоне спектра размеров 0,01–100 мкм по радиусу. Ключевой особенностью модели является параметризация амплитуды и ширины аэрозольных мод функции распределения частиц по размерам (ФРЧР) как функций разгона и скорости ветра. Исследованы форма ФРЧР и ее зависимость от высоты над уровнем моря и относительной влажности. Получено выражение для высотного профиля коэффициента аэрозольного ослабления; показаны различия в его спектрах на различных высотах, наиболее значительные в диапазоне высот 0–10 м, вследствие гравитационного влияния на средние и грубодисперсные фракции частиц морского солевого аэрозоля (МСА). Модель позволяет рассчитать комплексный показатель преломления частиц МСА в зависимости от влажности в диапазоне длин волн от 0,2 до 16 мкм. Определена область применимости модели.

*Ключевые слова:* микрофизика и оптика аэрозоля, рассеяние Ми, ветровой режим, разгон, параметризация, моделирование, программа; *microphysics and optics of aerosol, Mie scattering, wind mode, fetch, parameterization, modeling, software.*

## Введение

Одним из основных видов аэрозолей в атмосфере и доминирующим в морских и прибрежных условиях является морская солевая аэрозоль (МСА). Актуальность изучения МСА связана с его воздействием на пропускание и ослабление оптического излучения, которое существенно влияет на альбедо, радиационный баланс Земли и, следовательно, на ее глобальный и региональный климат. Радиационное воздействие аэрозолей имеет двойственный эффект: охлаждающий, что частично компенсирует воздействие парниковых газов, и разогревающий от поглощения солнечной радиации сажей. Аэрозоль вносит неопределенность в оценку суммарного радиационного воздействия. Ослабление излучения, вызванное молекулярной составляющей атмосферы, относительно постоянно и может быть рассчитано по известным алгоритмам и радиационным компьютерным кодам. Влияние частиц МСА, в силу их чрезвычайной изменчивости, менее детально изучено.

Цель работы — моделирование микрофизических и оптических характеристик частиц МСА в зависимости от ветрового режима, разгона волн, высоты и разработка микрофизической и оптической модели аэрозоля для спектрального диапазона 0,2–16 мкм с использованием решений Ми.

## Физическая природа происхождения частиц МСА

Морской солевой аэрозоль состоит из водяных капель и солевых частиц радиусом 0,01–1000 мкм. Размер частиц является центральным во всех аспектах их поведения, так как частицы разных размеров имеют различные концентрации, скорость образования, внутренние свойства (массу, площадь поверхности), время жизни и высоты перемешивания. Основные особенности этого поведения обобщены в табл. 1.

Одна из устоявшихся классификаций частиц морского и прибрежного аэрозоля, основанная на их размерах (дисперсности), предложена в [1]. Выделяют три основных типа частиц МСА: мелкодисперсный аэрозоль, появившийся в основном от разрыва пленок пузырьков с размерами частиц по радиусу 0,01–0,1 мкм и меньше при относительной влажности  $RH = 80\%$ ; среднелдисперсный аэрозоль радиусом  $0,1 < r_{80} < 1$  мкм из пленок лопающихся пузырьков и струйных капель и грубодисперсный аэрозоль (крупные частицы) — струйные и пенные капли радиусом до нескольких сотен микрометров,  $r_{80}$  — радиус частиц при  $RH = 80\%$ .

## Микрофизическая модель MaexPro

Основными причинами, влияющими на функцию распределения частиц по размерам (ФРЧР), являются ветровой режим (скорость ветра, направление

\* Геннадий Александрович Калошин (gkaloshin@ia.ru).

Свойства МСА в зависимости от размера частиц

Свойство	Размер частиц МСА		
	мелкодисперсный	среднедисперсный	грубодисперсный
$r_{80}$ , мкм	~(0,1 ÷ 1)	~(1 ÷ 25)	≥ 25
Преобладающий тип капель	Пленочный	Струйный	Струйный и пенный
Чувствительность к RH	≤ 0,1 с	от ~0,1 до ~50 с	≥ 50 с
Влияние гравитации	Незначительное	Существенное	Определяющее
Чувствительность к скорости ветра	≤ 3 · 10 <sup>-5</sup> с	от ~3 · 10 <sup>-5</sup> до ~0,02 с	≥ 0,1 с
Градиент вертикальной концентрации вблизи 10 м	Незначительный	Маленький	Очень большой
Высота перемешивания	Весь морской пограничный слой	Сильно меняется с $r_{80}$	Несколько метров над морской поверхностью
Время жизни	Дни/недели	Минуты/дни	Секунды
Распространенность в сравнении с не МСА-частицами	От низкой до высокой	Высокая	Высокая

и величина разгона\*), высота над уровнем моря и относительная влажность воздуха. Разгон по существу характеризует функцию источника генерации частиц МСА или размер области генерации с водной поверхности и концентрацию частиц МСА. Поэтому при разработке аэрозольной модели важен учет данных причин.

На основе экспериментального материала, полученного при выполнении международных программ EOPACE (Electro Optical Propagation Assessment in Coastal Environment) и RED (Rough Evaporation Duct) [2, 3] в 1999–2009 гг., в том числе с участием автора [4], была выполнена параметризация ФРЧР [5–9] в зависимости от ветрового режима, разгона ветровых волн, высоты и влажности. ФРЧР записывается в виде суммы четырех модифицированных логнормальных функций, наиболее адекватно описывающих реальные спектры размеров аэрозольных частиц в силу центральной предельной теоремы [10]:

$$\frac{dN}{dr} = \sum_{i=1}^4 \frac{A_i}{f} \exp \left\{ -C_i \left( \ln \left( \frac{r}{r_{0i}} \right) \right)^2 \right\}, \quad (1)$$

где

$$f = \left( \frac{2-S}{6(1-S)} \right)^{1/3} \quad (2)$$

– функция роста, зависящая от относительной влажности воздуха RH [11, 12];  $f(RH = 80\%) = 1$ ;  $S \equiv RH/100$  – индекс насыщения;  $A_i$  и  $C_i$  – амплитуда и ширина  $i$ -й моды соответственно;  $r_{0i}$  – модальные радиусы, равные 0,03; 0,24; 2 и 10 мкм.

На рис. 1 приведен пример ФРЧР микрофизической модели MaexPro (Marine Aerosol Extinction Profile), рассчитанной для характерных значений метеопараметров в морской и прибрежной атмосфере.

\* Разгон (англ. fetch) определяется расстоянием по открытой воде с наветренной стороны до места проведения измерений. Содержится в океанографических справочниках и определен для большинства прибрежных районов.

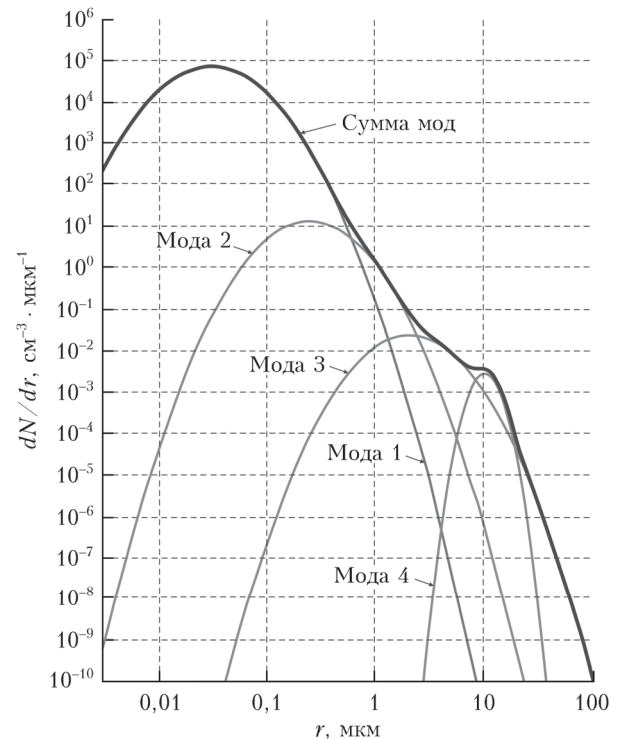


Рис. 1. ФРЧР модели MaexPro при RH = 80%, U = 3,5 м/с, X = 70 км, H = 10 м;  $r_{0i} = 0,03; 0,24; 2$  и 10 мкм

В модели вещество аэрозоля определено в виде смеси четырех субстанций: пыли и частиц аэрозоля континентального происхождения (сухое растворимое и нерастворимое вещества), морской соли и воды. Используются четыре различных типа аэрозольных частиц, каждый из которых имеет свой средний размер (моду) и каждый из которых по-разному меняется при изменении влажности. Первая мода, равная 0,03 мкм, соответствует мелкодисперсному аэрозолю континентального происхождения. Вторая (0,24 мкм), зависящая от скорости ветра, усредненного за сутки, – морскому аэрозолю. Третья (2 мкм) – морскому аэрозолю, зависящему от текущей скорости ветра. Четвертая (10 мкм) описывает самые крупные частицы грубодисперсного аэрозоля. В модели выбран

спектр размеров частиц от 0,01 до 100 мкм, как наиболее эффективно рассеивающих свет в оптическом диапазоне 0,2–16 мкм.

Разгон как параметр величины источника генерации для характеристики микрофизического состава и ФРЧР принят нами в работах [4, 13–20]. В них показано, что амплитуду  $A_i$  и ширину  $C_i$   $i$ -й моды ФРЧР удается параметризовать как функции разгона  $X$  и скорости ветра  $U$ :

$$\begin{aligned}
 A_1 &= -2,5 \cdot 10^4 \ln(X/X_0) + 1,5 \cdot 10^5, \\
 A_2 &= 10^{\{(0,0296 \ln(X/X_0) - 0,045)(U/U_0) - 0,385 \ln(X/X_0) + 2,1673\}}, \\
 A_3 &= 10^{\{(0,046 \ln(X/X_0) - 0,0437)(U/U_0) - 0,465 \ln(X/X_0) - 0,523\}}, \\
 A_4 &= 10^{\{(0,0095 \ln(X/X_0) + 0,0168)(U/U_0) + 0,1424 \ln(X/X_0) - 3,2\}}, \\
 C_1 &= -0,190 \ln(X/X_0) + 1,679, \\
 C_2 &= -0,148 \ln(X/X_0) + 1,698, \\
 C_3 &= -0,295 \ln(X/X_0) + 2,188, \\
 C_4 &= 10,
 \end{aligned} \tag{3}$$

где  $X_0 = 1$  км и  $U_0 = 1$  м/с.

На рис. 2 представлены экспериментально измеренные ФРЧР и рассчитанная по модели MaexPro. Рисунок иллюстрирует хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных ФРЧР.

## Оптическая модель MaexPro

Другой характеристикой, определяющей оптические свойства аэрозоля, является комплексный показатель преломления (КПП)  $m$ . Как было отмечено, частицы аэрозоля в модели MaexPro состоят из смеси четырех субстанций (табл. 2). Они представляют

собой пыль (1), растворимое вещество, смешанное с водой (2), морскую соль (3) и воду (4). Каждой субстанции аэрозоля соответствует свой КПП, выбранный из табличных данных для соответствующей длины волны в диапазоне 0,2–16 мкм (см. ссылки в табл. 2).

Таблица 2

Состав частиц МСА

Мода	Вещество	Размер, мкм	Ссылка
1	Нерастворимое	0,03	[12]
2	Растворимое	0,24	[21]
3	Соль + вода	2	[12]
4	Соль + вода	10	[22]

Моделирование показателя преломления частицы ( $n$ ) в зависимости от изменения влажности выполнено в соответствии с правилом смеси, предложенным в [11]:

$$n = n_w + (n_0 - n_w)(f^3(0)/f^3(S)), \tag{4}$$

где  $n_0$  – показатель преломления сухой частицы;  $n_w$  – показатель преломления воды. Учет влияния влажности осуществляется посредством введения фактора роста  $f(r/r_0)$ .

С учетом выражения (2), (4) действительная ( $n$ ) и мнимая части ( $\kappa$ ) КПП частиц МСА могут быть записаны в виде

$$n = n_w + (n_0 - n_w)(r_w/r_0)^{-3}, \tag{5}$$

$$\kappa = \kappa_w + (\kappa_0 - \kappa_w)(r_w/r_0)^{-3}, \tag{6}$$

где индексы  $w$  и  $0$  относятся к влажной и сухой фазам соответственно;  $r$  – радиус частицы. Расчет  $n$  и  $\kappa$  выполняется для каждой из мод с использованием программ [23, 24] на основе оптических постоянных вещества частиц, правила смеси, априорной

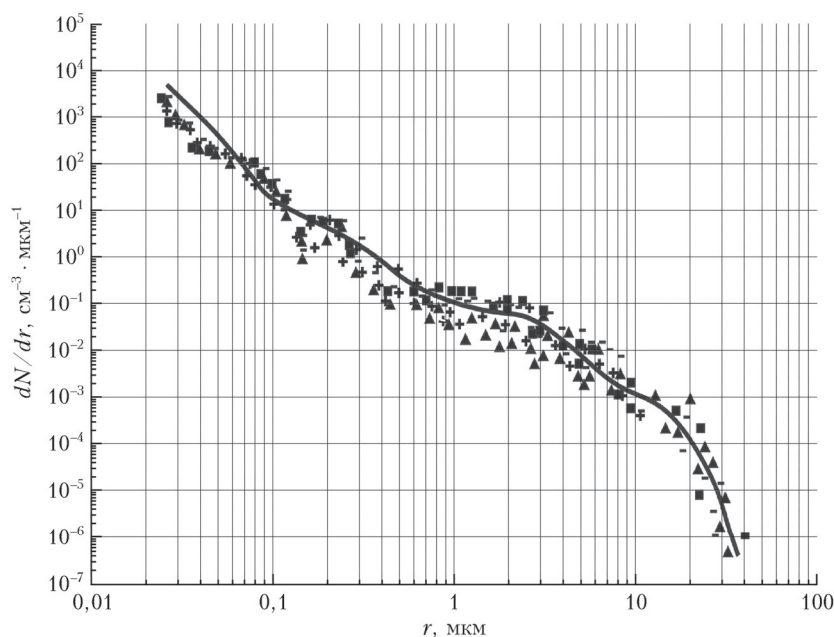


Рис. 2. Измеренные ФРЧР (крестики [1], треугольники [2], квадратики [1], черточки [4]) и рассчитанная по модели MaexPro (линия) на высоте 10 м при  $RH = 80\%$ ,  $X = 30$  км и  $U = 3,5–4,5$  м/с

оценки фактора роста увлажненной пробы частиц аэрозоля и средней плотности сухого вещества частиц. Каждому типу аэрозоля соответствует свой показатель преломления, выбранный из табличных данных для определенной длины волны в диапазоне 0,2–16 мкм [21, 22], например, для частиц МСА на длине волны  $\lambda = 0,55$  мкм при  $RH = 80\%$ ;  $n = 1,448$ ;  $\kappa = 7,491 \cdot 10^{-9}$ . Зависимостью комплексного показателя преломления веществ от температуры можно пренебречь в силу относительно незначительных ее изменений в приземном слое атмосферы [25].

В настоящее время эффективным методом расчета рассеянного излучения сферическими частицами аэрозоля с размерами много меньше длины волны являются приложения теории Ми [26]. Из решений Ми, работ [25] и [27] следует, что если известны ФРЧР ( $dN/dr$ ) и КПП вещества частиц аэрозоля и частицы имеют форму сфер, то можно рассчитать элементы матрицы рассеяния, индикатрису, коэффициенты аэрозольного рассеяния и ослабления, сечения ослабления, рассеяния и поглощения, а также счетную концентрацию и распределение объемов. Из решений следуют соотношения между  $dN/dr$  и коэффициентами аэрозольного ослабления  $\epsilon(\lambda)$  и рассеяния  $\sigma(\lambda)$ , которые записываются в виде

$$\epsilon(\lambda) = \int_{r=0}^{r=\infty} K(\rho, m) \frac{dN(r)}{dr} \pi r^2 dr, \quad (7)$$

$$\sigma(\lambda) = \int_{r=0}^{r=\infty} K_p(\rho, m) \frac{dN(r)}{dr} \pi r^2 dr, \quad (8)$$

где  $K(\rho, m)$  и  $K_p(\rho, m)$  – коэффициенты Ми (факторы эффективности ослабления и рассеяния);  $m$  – комплексный показатель преломления;  $\rho = 2\pi r/\lambda$  – относительный размер частицы.

Впервые этот метод был применен при разработке аэрозольной модели NAM [28]. Но настоящий прогресс в развитии метода наблюдается в последние годы. Это связано с появлением быстродействующих компьютеров и развитием эффективных алгоритмов для вычисления специальных функций. Аэрозольная модель NAM дает хороший прогноз ослабления оптического излучения только для высот 10–12 м над ур. м., на которых был получен основной экспериментальный материал. Однако наблюдения в рамках программ EORACE и RED в 1999–2009 гг. [2, 3] выявили, что модель дает существенно отличающиеся результаты при прогнозе пропускания на других высотах. Обработка данных этих наблюдений показала выраженный высотный профиль  $\epsilon(\lambda)$ , который наиболее рельефно проявляется в диапазоне высот 0–25 м, особенно в ИК-области спектра, важном для радиационных задач. Неучет этого может привести к искаженным значениям  $\epsilon(\lambda)$  при расчетах по коду MODTRAN [29], во все версии которого входят модели NAM либо ANAM [30], и, соответственно, к возможным неопределенностям в радиационных блоках современных численных моделей долгосрочного прогноза погоды и климатических моделей [31].

Имеющаяся база данных экспериментальных наблюдений позволила получить выражение для высотного профиля  $\epsilon_H(\lambda)$  модели MaexPro, связанное с высотным профилем функции роста  $f_H$ , в виде

$$\left( \frac{\epsilon_H}{\epsilon_{0M}} \right) = \left( \frac{0,037}{1,017 - f_H/100} \right)^{0,84}, \quad (9)$$

где  $\epsilon_{0M}$  – коэффициент аэрозольного ослабления на нулевой высоте. Расчет высотных профилей функции  $f$  осуществляется при условиях:

$$\begin{aligned} &\text{если } 20 \leq H \leq 25 \text{ м, то } f = f_{25M}; \\ &\text{если } H \leq 20 \text{ м и } f \leq f_{25M}, \text{ то } f = f_{25M}; \\ &\text{иначе если } H \leq 20 \text{ м, то } f = (f_{25M} + 7)H^{-0,03}. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь  $f_{25M}$  – функция роста на высоте 25 м. Экстраполяция применима для диапазона значений  $RH$  от 40 до 98%.

На рис. 3 показаны рассчитанные по MaexPro высотные профили спектральных коэффициентов аэрозольного ослабления  $\epsilon(\lambda)$ . Видны значительные различия в спектрах  $\epsilon(\lambda)$  на различных высотах наблюдения, что соответствует экспериментальным данным, полученным при выполнении программ EORACE и RED [2, 3]. При этом наиболее значительное изменение  $\epsilon(\lambda)$  происходит в диапазоне высот 0–10 м, что является следствием гравитационного влияния на среднюю и грубодисперсную фракции частиц МСА.

## Программная реализация модели

Несмотря на то что решения Ми характеризуются как «аналитические», расчеты в силу значительной громоздкости и трудоемкости вычислений выполняются на компьютере.

На рис. 4 приведена структурная блок-схема пакета программ MaexPro, на которой показаны основные этапы вычислений. Расчет спектральных коэффициентов аэрозольного ослабления происходит в соответствии с последовательностью, приведенной на структурной блок-схеме. Вводятся входные параметры в области применимости модели, т.е. данные по микрофизическому составу аэрозоля, спектральному диапазону и необходимым метеорологическим условиям. Расчет  $dN/dr$  осуществляется для каждой моды, которые суммируются, и строится общее распределение. При этом расчет спектров может осуществляться как по ФРЧР ( $dN/dr$ ) MaexPro, которая запускается по умолчанию, так и по  $dN/dr$ , полученным экспериментально [32].

На рис. 5 показан интерфейс модели MaexPro. Главное меню пакета MaexPro 5.0 состоит из трех частей: меню раздела (вид расчета, правка, модель, история последних расчетов, справка), области ввода входных параметров и составных окон, которые делятся на четыре группы: базис, вертикальные профили, спектры аэрозольного ослабления, спектры ослабления мод. В составных окнах осуществляется отображение полученных результатов в виде графиков, числовых значений и таблицы. На рис. 5 показано одно из составных окон – «Базис MaexPro».

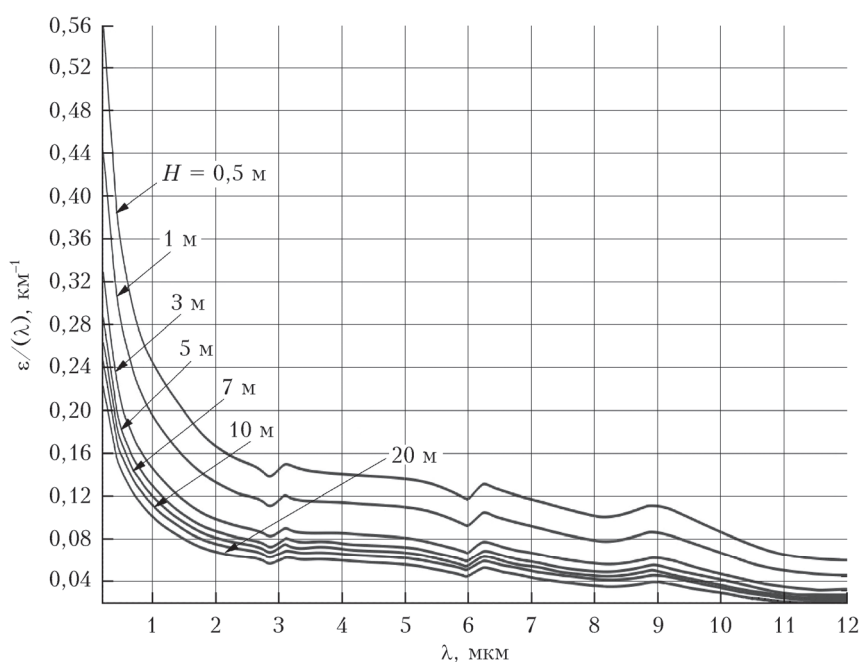


Рис. 3. Спектральные коэффициенты аэрозольного ослабления для разных высот при  $U = 3,5$  м/с,  $RH = 80\%$  и  $X = 70$  км



Рис. 4. Структурная блок-схема пакета программ MaexPro

### Область применимости модели

Модель MaexPro выполнена для спектра размеров частиц от 0,01 до 100 мкм по радиусу и развита к настоящему времени для диапазона высот от

0 до 25 м, в котором происходят наиболее существенные изменения микрофизического состава. Диапазон изменения скорости ветра составляет от 3 до 18 м/с; величина разгона находится в диапазоне от 3 до 120 км; относительная влажность — от 40 до 98%.

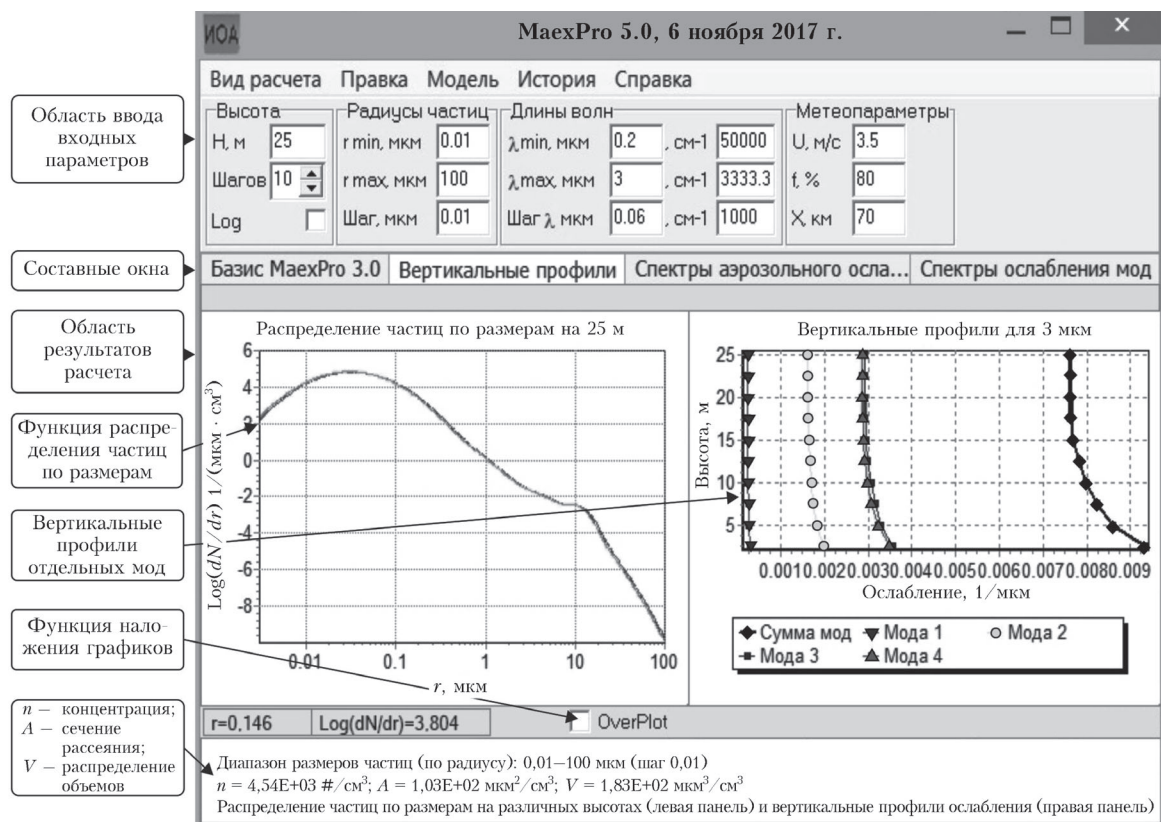


Рис. 5. Интерфейс модели MaexPro

## Заключение

На основании вышесказанного можно сделать следующие выводы:

1. Использование положений теории Ми при моделировании свойств морского и прибрежного аэрозоля оказалось эффективным и плодотворным. Этот подход позволил разработать модель аэрозоля приземного слоя морской и прибрежной атмосферы MaexPro. Ключевой особенностью модели является параметризация амплитуды и ширины аэрозольных мод функции распределения частиц по размерам как функций разгона и скорости ветра.

2. Моделирование микрофизического состава частиц МСА по модели показывает хорошее совпадение расчетной по MaexPro и измеренных ФРЧР.

3. Программная реализация модели позволяет рассчитывать спектральные и высотные профили коэффициентов аэрозольного ослабления и рассеяния в зависимости от метеорологических параметров, микрофизического состава аэрозоля, ветрового режима, геометрии измерений и получать количественные данные комплексных показателей преломления частиц МСА в зависимости от влажности в диапазоне длин волн от 0,2 до 16 мкм.

1. Lewis E.R., Schwartz S.E. Sea salt aerosol production: Mechanisms, methods, measurements, and models – a critical review // *Geophys. Monogr. Ser. AGU, Washington, DC*. 2004. 413 p.
2. Jensen D.R., Gathman S.G., Zeisse C.R., Littfin K.M. EOPACE (Electrooptical Propagation Assessment in

- Coastal Environments) overview and initial accomplishment // *J. Aerosol Sci.* 1999. V. 30, suppl. 1. P. 53–54.
3. Jensen D.R., Gathman S.G., Zeisse C.R., McGrath C.P., Leeuw de G. Electro-optical propagation assessment in coastal environments (EOPACE): Summary and accomplishments // *Opt. Eng.* 2001. V. 40, N 8. P. 1486–1498.
4. Piazzola J., Kaloshin G., De Leeuw G., van Eijk A.M.J. Aerosol extinction in coastal zone // *Proc. 11th SPIE Intern. Symp. Remote Sensing. Maspalomas, Canary Islands, Spain*. 2004. V. 5572. P. 94–100.
5. Kaloshin G.A. Visible and infrared extinction of atmospheric aerosol in the marine and coastal environment // *Appl. Opt.* 2011. V. 50, N 14. P. 2124–2133.
6. Alexeev A., Kaloshin G.A. Influence of microphysical characteristics volatility of aerosol on a spectral transparency in the surface boundary layer of the atmosphere // *Proc. European Aerosol Conf. (EAC2003). Madrid, Spain*. 2003. P. 40.
7. Kaloshin G. Aerosol extinction in the marine atmospheric surface layer // *Proc. 25th Anniversary IGARSS. Seoul, Korea*. 2005. P. 377–378.
8. Свириденков М.А., Михайлов Е.Ф., Небосько Е.Ю. Параметризация среднего косинуса индикатрисы рассеяния света атмосферным аэрозолем // *Оптика атмосф. и океана*. 2017. Т. 30, № 5. С. 377–382; Свириденков М.А., Михайлов Е.Ф., Небосько Е.Ю. Parameterization of asymmetry factor of atmospheric aerosol scattering phase function // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 5. P. 435–440.
9. Веретенников В.В., Меньщикова С.С. Модифицированный алгоритм восстановления микроструктуры аэрозоля из измерений спектрального ослабления света на основе гибридной модели // *Оптика атмосф. и океана*. 2015. Т. 28, № 11. С. 966–971; Veretennikov V.V., Men'shchikova S.S. Modified algorithm for reconstruct-

- ting the aerosol microstructure from measurements of spectral light extinction on the basis of the hybrid model // *Atmos. Ocean. Opt.* 2016. V. 29, N 1. P. 27–32.
10. Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометиздат, 1986. 256 с.
  11. Hänel G. The of aerosol properties during the condensational stage of clouds: A reinvestigation of numerics and microphysics // *Beitr. Phys. Atmosph.* 1987. V. 60(3). P. 321–339.
  12. Shettle E.P., Fenn R.W. Models for the Aerosols of the Lower Atmosphere and the Effects of Humidity Variations on Their Optical Properties (Environmental Research Papers N 676). Bedford, MA: AF Geophysics Laboratory, 1979. 25 p.
  13. Калошин Г.А., Шишкин С.А. Программно-технологический пакет Range для проведения расчетов распространения оптического излучения с учетом аэрозольного ослабления в приземном слое континентальной, морской и прибрежной атмосферы // Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ № 2012616944 от 3.08.2012.
  14. Piazzola J., Kaloshin G. Influence of meteorological parameters on aerosol extinction in the marine atmospheric surface layer // *J. Aerosol Sci. Abstr. European Aerosol Conf. Budapest, Hungary.* 2004. V. I. P. S535–S536.
  15. Kaloshin G.A. Influence of meteorological parameters on aerosol extinction in the marine environment // *Proc. Intern. Conf. ICONO/LAT. St. Petersburg,* 2005. P. 33–35.
  16. Piazzola J., Kaloshin G. Performance evaluation of the coastal aerosol extinction code “MEDEX” with data from the Black Sea // *J. Aerosol Sci.* 2005. V. 36, N 3. P. 341–359.
  17. Калошин Г.А. Влияние ветрового режима на аэрозольное ослабление морской и прибрежной атмосферы // *Оптика атмосф. и океана.* 2007. Т. 20, № 7. С. 571–576.
  18. Kaloshin G.A., Shishkin S.A. Detectable distance calculations for a visual navigation system using a scanning semiconductor laser with electronic pumping // *Appl. Opt.* 2011. V. 50, N 20. P. 3442–3448.
  19. Kaloshin G.A. Forecasting of aerosol extinction of the sea and coastal atmosphere surface layer // *Proc. SPIE.* 2010. V. 7678. 5–9 April 2010. Orlando, Florida, United States. P. 76780B-1–76780B-14.
  20. Kaloshin G.A., Matvienko G.G. Aerosol microphysical model of the marine and coastal atmosphere surface layer for calculation of extinction in visible and IR radiation wave band // *Proc. 5th Asian Aerosol Conf. Kaohsiung, Taiwan. Proc. SPIE – The Intern. Soc. Opt. Eng. Belarus, Minsk.* 2007. P. 67330B.
  21. Volz F.E. IR index of atmospheric aerosol substances // *Appl. Opt.* 1972. V. 11. P. 755–759.
  22. Hale G.M., Query M.R. Optical constants of water in the 200 nm to 200  $\mu\text{m}$  wavelength region // *Appl. Opt.* 1973. V. 12. P. 555–563.
  23. Калошин Г.А., Шишкин С.А. Программа для расчета комплексных показателей преломления вещества частиц морского и прибрежного аэрозоля MieCalc // Свидетельство о госрегистрации программ для ЭВМ № 2012616943 от 03.08.2012.
  24. Калошин Г.А., Шишкин С.А., Жуков В.В. Микрофизические и оптические характеристики морского и прибрежного аэрозоля // Свидетельство о госрегистрации базы данных № 2015621775 от 14.12.2015.
  25. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 530 с.
  26. Mie G. A contribution to the optics of turbid media, especially colloidal metallic suspensions // *Ann. Phys.* 1908. V. 25. P. 377–445.
  27. Ван де Хюлст Г.Х. Рассеяние света малыми частицами. М.: Изд-во иностр. лит., 1961. 536 с.
  28. Gathman S.G. Optical properties of the marine aerosol as predicted by the Navy aerosol model // *Opt. Eng.* 1983. V. 22(1). P. 57–62.
  29. MODTRAN® [Electronic resource]. URL: <http://www.modtran.spectral.com/> (last access: 24.06.2018).
  30. Gathman S.G., van Eijk A.M.J., Cohen L.H. Characterizing large aerosols in the lowest levels of the marine atmosphere // *Proc. SPIE.* 1998. V. 3433. P. 41–52.
  31. Клиmeshина Т.Е., Пташник И.В. Программный код для восстановления континуального поглощения водяного пара из экспериментальных данных // *Оптика атмосф. и океана.* 2018. Т. 31, № 5. С. 335–340; Клиmeshина Т.Е., Пташник И.В. Software for retrieving the water vapor continuum absorption from experimental data // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 5. P. 451–456.
  32. Калошин Г.А., Шишкин С.А. Программа для расчета спектральных коэффициентов аэрозольного ослабления в приземном слое морской и прибрежной атмосферы MaexPro // Свидетельство о госрегистрации программ для ЭВМ № 20126169945 от 3.08.2012.

**G.A. Kaloshin. Development of the MaexPro aerosol model of marine and coastal atmosphere surface layer.**

MaexPro aerosol model of marine and coastal surface layer is presented. It is based on long-term observations of the particles sizes distribution in the 0.01–100  $\mu\text{m}$  size range. A key feature of the model is the parameterization of the amplitude and width of modes of the aerosol size distribution function (ASDF) as functions of fetch and wind speed. The ASDF form and dependences on the altitude above sea level and relative humidity are studied. An expression is derived for the altitude profile of the aerosol extinction coefficient. Significant differences in its spectra at different altitudes are shown, the most pronounced in the altitude range from 0 to 10 m due to the gravitational effect on the medium and coarse fractions of the marine salt aerosol (MSA) particles. The model allows calculation of optical indexes of MSA particles versus the humidity in the wavelength range 0.2–16  $\mu\text{m}$ . The domain of applicability of the model is determined.