

МОДЕЛЬ АНТАРКТИЧЕСКОГО ПРИБРЕЖНОГО АЭРОЗОЛЯ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ В РАЙОНЕ ГОРЫ ВЕЧЕРНЕЙ

А. В. Малинка*, М. М. Король, И. А. Алексеев, В. А. Базылевич,
А. И. Калевич, В. А. Пещеренков, В. П. Дик

УДК 551.594.25

<https://doi.org/10.47612/0514-7506-2023-90-2-310-315>

Институт физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь; e-mail: a.malinka@ifanbel.bas-net.by

(Поступила 31 января 2023)

Представлены результаты обработки данных измерений характеристик антарктического аэрозоля белорусской антарктической экспедицией на станции AERONET Vechernaya_Hill за период наблюдений с 2008 по 2022 гг. Сформирована модель аэрозоля “Вечерняя”, которая представляет собой типичный аэрозоль для побережья Антарктиды в районе горы Вечерней. Модель существенно отличается от предлагаемых в литературе моделей прибрежного аэрозоля Антарктики и может быть использована в различных приложениях, в частности, при атмосферной коррекции спутниковых данных.

Ключевые слова: аэрозоль, Антарктида, AERONET, гора Вечерняя.

The article presents the results of processing the data of measuring the characteristics of the Antarctic aerosol by the Belarusian Antarctic Expedition at the Vechernaya_Hill AERONET station. The data for the entire period of observations from 2008 to 2022 were processed. The Vechernyaya aerosol model was formed, which is a typical aerosol for the coast of Antarctica near Mount Vechernyaya. The model differs significantly from models of Antarctic coastal aerosol proposed in the literature and can be used in various applications, in particular, in atmospheric correction of satellite data.

Keywords: aerosol, Antarctica, AERONET, Mount Vechernyaya.

Введение. При моделировании переноса излучения в атмосфере, в частности, при климатологических расчетах или обработке спутниковых данных необходимо знание оптических характеристик атмосферного аэрозоля. Данные измерений в определенной точке в конкретный момент времени, как правило, недоступны, поэтому для расчета часто используется региональная модель аэрозоля, типичного для заданного района. В настоящей работе представлена модель аэрозоля “Вечерняя”, типичного для побережья Антарктиды в районе белорусской антарктической станции “Гора Вечерняя”. Модель основана на многолетних измерениях в белорусских антарктических экспедициях.

Методика измерений. Основной объем научных результатов радиометрических исследований в атмосфере Земли создается в рамках работы глобальной сети радиометрических станций AERONET [1], организующей работу более 400 измерительных станций на планете. Регулярные радиометрические наблюдения в Антарктиде начались в 2007 г. на Южном полюсе американским пунктом наблюдений сети AERONET South_Pole_Obs_NOAA. В 2008 г. сотрудниками Института физики НАН Беларуси при содействии ученых из лаборатории оптики атмосферы Лилльского университета (Франция) в районе горы Вечерней была создана станция радиометрического зондирования Vechernaya_Hill (67°39'32.9" ю. ш., 46°09'8.2" в. д., 80 м над уровнем моря), ставшая третьей станцией AERONET в Антарктиде. С тех пор на пространстве Антарктиды зарегистрировано более десяти станций AERONET, однако регулярные наблюдения выполняются только на пяти из них, в том числе на станции Vechernaya_Hill.

MODEL OF ANTARCTICA COAST AEROSOL ACCORDING TO MEASURING DATA NEAR MOUNT VECHERNYAYA

A. V. Malinka*, M. M. Korol, I. A. Alekseev, V. A. Basylevich, A. I. Kalevich, V. A. Pescherenkov,
V. P. Dick (Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus; e-mail: a.malinka@ifanbel.bas-net.by)

В качестве измерительного прибора на станциях AERONET используется спектральный сканирующий солнечный фотометр CE-318, изготовленный фирмой CIMEL [2]. Прибор регистрирует два типа сигналов: прямое солнечное излучение на длинах волн 340, 380, 440, 500, 675, 870 и 1020 нм и излучение, рассеянное атмосферой в принципиальной плоскости и альмукантарате, на длинах волн 440, 670, 870 и 1020 нм. Методика измерений и обработки данных разработана в Центре космических полетов им. Годдарда (НАСА) [3] и остается единой для всех станций AERONET и неизменной за весь период наблюдений. Результатом обработки данных радиометра является восстановление усредненных по атмосферному слою параметров аэрозоля: аэрозольной оптической толщины, показателя Ангстрема, альbedo однократного рассеяния, распределения частиц аэрозоля по размерам, показателя преломления (его действительная и мнимая части) и индикатрисы рассеяния [4]. Данные наблюдений, как “сырые”, так и обработанные, доступны онлайн в единой базе данных AERONET [1]. В период экспедиций с 2008 по 2022 гг. на радиометрической станции Vechernaya_Hill проведено 1264 суточных цикла радиометрических измерений.

Результаты и их обсуждение. Основным параметром аэрозольного слоя является его оптическая толщина (AOD, aerosol optical depth). На рис. 1 представлен временной ряд оптической толщины аэрозоля на длине волны 550 нм (AOD550), измеренной на станции Vechernaya_Hill. Показаны как общая AOD, так и относящаяся к тонкой и грубой фракциям. Видно, что аэрозоль состоит в основном из мелких частиц (тонкая фракция), причем подавляющее большинство значений лежит в интервале отклонений $\pm\sigma$. AOD, выходящие далеко за рамки этого интервала, по-видимому, обусловлены выносами аэрозоля, не типичного для береговой антарктической зоны.

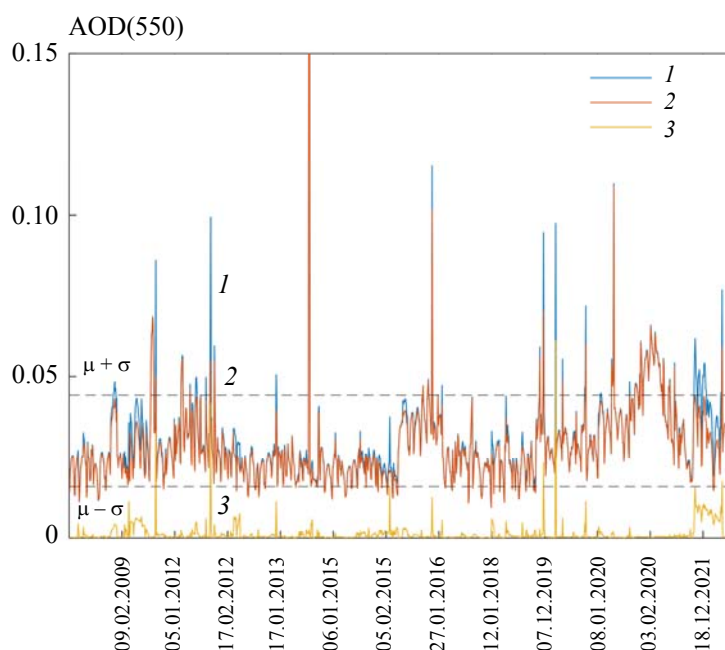


Рис. 1. Временной ряд оптической толщины аэрозоля на длине волны 550 нм (AOD550), измеренной на станции Vechernaya_Hill: 1 — полная оптическая толщина, 2 — тонкая фракция, 3 — грубая фракция, пунктир — среднее значение \pm стандартное отклонение

На рис. 2 приведены гистограммы оптической толщины и альbedo однократного рассеяния ω_0 (вероятности выживания фотона) на длине волны 550 нм. Вертикальными линиями показаны медианное значение и второй (средний) квартиль (пунктир), содержащий 50 % значений, сосредоточенных вблизи медианы. Медианное значение AOD составляет 0.027, интерквартильный размах 0.013. Таким образом, значение AOD = 0.027 может быть принято за априорное в отсутствие данных измерения. Медианное значение альbedo однократного рассеяния $\omega_0 = 0.9961$. Станции AERONET проводят измерения и обработку данных на стандартных длинах волн: 440, 675, 870 и 1020 нм. Значение на 550 нм рассчитано с помощью линейной интерполяции в двойной логарифмической шкале.

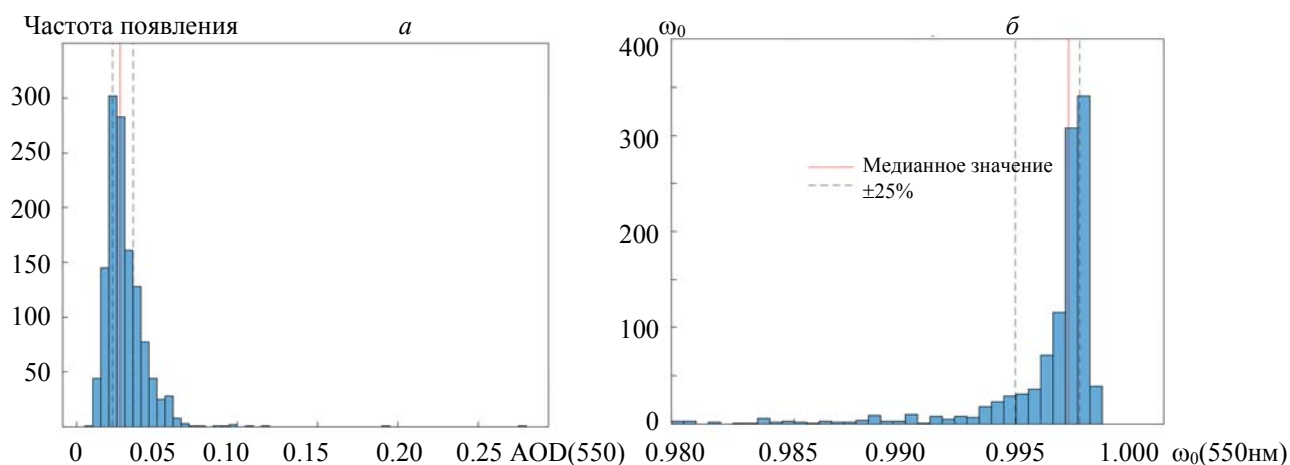


Рис. 2. Гистограмма оптической толщины (а) и альбедо однократного рассеяния (б)

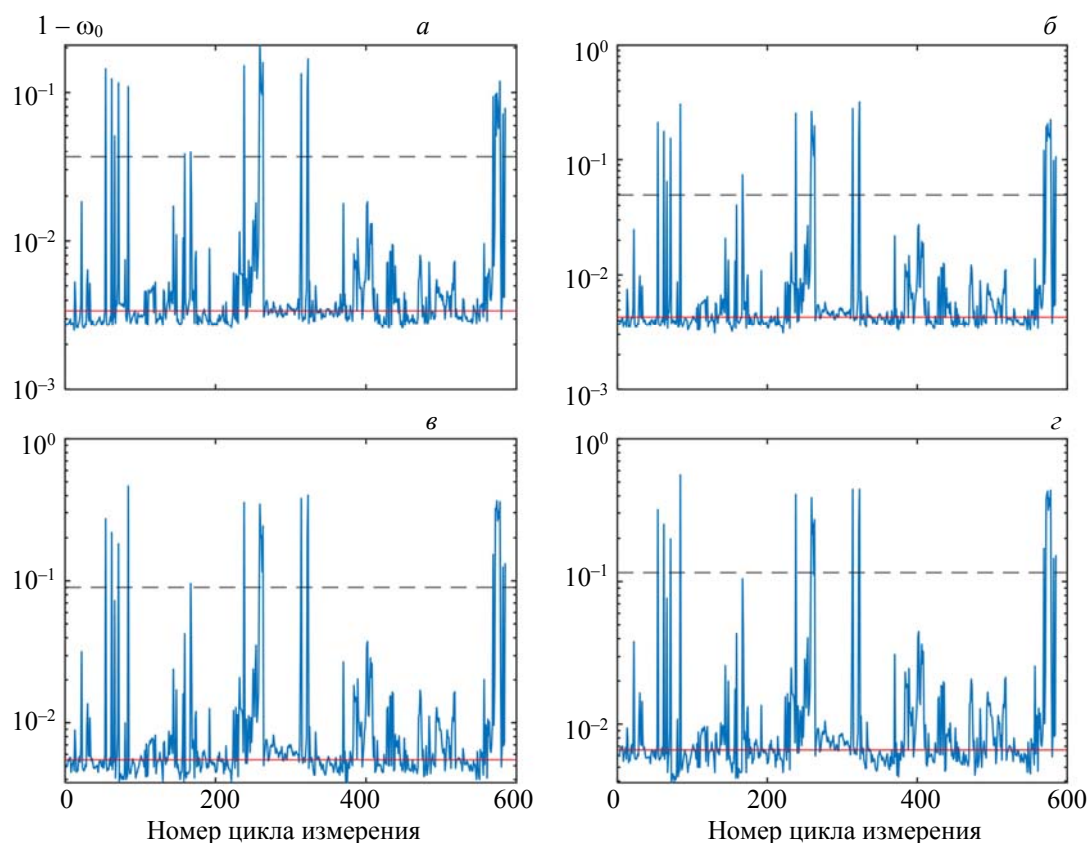


Рис. 3. Временные ряды ко-альбедо однократного рассеяния, измеренные на станции Vechernaya_Hill на 440 (а), 675 (б), 870 (в) и 1020 нм (г)

На рис. 3 представлены временные ряды ко-альбедо однократного рассеяния ($1 - \omega_0$) на указанных длинах волн. Сплошной горизонтальной линией показано медианное значение, пунктиром — соответствующее значение модели Water-soluble [5] — одной из стандартных моделей аэрозоля, используемых Всемирной метеорологической организацией [6]. Как видно, значения ко-альбедо аэрозоля, типичного для района горы Вечерней, значительно ниже соответствующих значений модели Water-soluble, что свидетельствует о меньшем поглощении. Подобное различие может быть обусловлено меньшим влиянием промышленных выбросов на аэрозоль Антарктики, чем на тонкую аэрозольную фракцию северного полушария, для описания которой разрабатывалась модель Water-soluble.

Таким образом, модель Water-soluble оказывается малоприспособленной для описания антарктического аэрозоля. Значение $\omega_0 = 0.9961$, полученное из измерений AERONET на станции Vechernaya_Hill, также сильно расходится со значением 0.958, рекомендуемым в обзоре исследований полярных аэрозолей [7] для тонкой фракции на побережье Антарктики в период антарктического лета (последнее очень близко к значению 0.9568 модели Water-soluble). Спектральные характеристики аэрозоля (AOD и ω_0), типичные для района горы Вечерней (далее — модель “Вечерняя”), приведены в табл. 1.

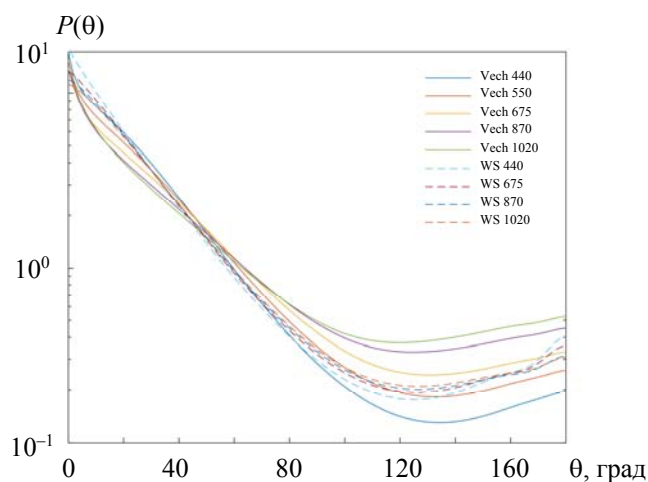


Рис. 4. Индикатрисы рассеяния на различных длинах волн для модели “Вечерняя” и Water-soluble

Т а б л и ц а 1. Спектральные характеристики аэрозоля модели “Вечерняя”

λ , нм	440	550	675	870	1020
AOD	0.0428	0.0271	0.0185	0.0100	0.0069
ω_0	0.9966	0.9961	0.9957	0.9945	0.9934

Для расчета переноса излучения в атмосферном слое требуется знание индикатрисы рассеяния. В силу различной угловой зависимости для разных фракций значения модельной индикатрисы не могут быть получены как медианные значения индикатрис для заданного угла, так как при этом нарушается нормировка индикатрисы. Вследствие этого модельная индикатриса рассчитывалась как средняя по выборке значений, соответствующих второму квартилю значений ω_0 (область между двумя пунктирными линиями на рис. 2). Результирующие индикатрисы для различных длин волн показаны на рис. 4 и в табл. 2. Для сравнения на рис. 4 также показаны индикатрисы рассеяния модели Water-soluble. Отметим, что индикатрисы модели “Вечерняя” не только отличаются от индикатрис модели Water-soluble, но и заметно различаются между собой для разных длин волн.

Т а б л и ц а 2. Индикатриса рассеяния аэрозоля модели “Вечерняя” на пяти длинах волн

Угол, град	440 нм	550 нм	675 нм	870 нм	1020 нм
0.0000E+00	1.7003E+01	1.5385E+01	1.3801E+01	1.3659E+01	1.3833E+01
1.7100E+00	1.3061E+01	1.2083E+01	1.1062E+01	1.1326E+01	1.1795E+01
3.9300E+00	1.0867E+01	9.8643E+00	8.8747E+00	8.9373E+00	9.3093E+00
6.1600E+00	9.6793E+00	8.6409E+00	7.6561E+00	7.5459E+00	7.7978E+00
8.3900E+00	8.8568E+00	7.8070E+00	6.8371E+00	6.6034E+00	6.7642E+00
1.0630E+01	8.1933E+00	7.1632E+00	6.2263E+00	5.9030E+00	5.9898E+00
1.2860E+01	7.5980E+00	6.6182E+00	5.7332E+00	5.3487E+00	5.3728E+00
1.5100E+01	7.0524E+00	6.1422E+00	5.3201E+00	4.8993E+00	4.8737E+00
1.7330E+01	6.5253E+00	5.7003E+00	4.9511E+00	4.5140E+00	4.4489E+00
1.9570E+01	6.0201E+00	5.2872E+00	4.6150E+00	4.1773E+00	4.0830E+00
2.1800E+01	5.5366E+00	4.8984E+00	4.3045E+00	3.8785E+00	3.7625E+00
2.4040E+01	5.0758E+00	4.5308E+00	4.0140E+00	3.6082E+00	3.4774E+00

Продолжение табл. 2

Угол, град	440 нм	550 нм	675 нм	870 нм	1020 нм
2.6280E+01	4.6384E+00	4.1824E+00	3.7398E+00	3.3603E+00	3.2208E+00
2.8510E+01	4.2273E+00	3.8539E+00	3.4811E+00	3.1315E+00	2.9882E+00
3.0750E+01	3.8433E+00	3.5451E+00	3.2369E+00	2.9189E+00	2.7759E+00
3.2980E+01	3.4864E+00	3.2555E+00	3.0061E+00	2.7203E+00	2.5810E+00
3.5220E+01	3.1557E+00	2.9843E+00	2.7878E+00	2.5340E+00	2.4010E+00
3.7450E+01	2.8514E+00	2.7317E+00	2.5823E+00	2.3595E+00	2.2345E+00
3.9690E+01	2.5729E+00	2.4975E+00	2.3896E+00	2.1963E+00	2.0803E+00
4.1930E+01	2.3189E+00	2.2811E+00	2.2095E+00	2.0440E+00	1.9373E+00
4.4160E+01	2.0878E+00	2.0816E+00	2.0412E+00	1.9017E+00	1.8044E+00
4.6400E+01	1.8784E+00	1.8981E+00	1.8843E+00	1.7687E+00	1.6809E+00
4.8630E+01	1.6892E+00	1.7298E+00	1.7383E+00	1.6446E+00	1.5661E+00
5.0870E+01	1.5186E+00	1.5757E+00	1.6027E+00	1.5288E+00	1.4594E+00
5.3110E+01	1.3652E+00	1.4350E+00	1.4771E+00	1.4209E+00	1.3602E+00
5.5340E+01	1.2275E+00	1.3068E+00	1.3610E+00	1.3206E+00	1.2682E+00
5.7580E+01	1.1042E+00	1.1903E+00	1.2540E+00	1.2276E+00	1.1828E+00
5.9810E+01	9.9392E-01	1.0847E+00	1.1556E+00	1.1415E+00	1.1037E+00
6.2050E+01	8.9547E-01	9.8895E-01	1.0652E+00	1.0619E+00	1.0306E+00
6.4290E+01	8.0763E-01	9.0231E-01	9.8224E-01	9.8837E-01	9.6294E-01
6.6520E+01	7.2932E-01	8.2399E-01	9.0623E-01	9.2054E-01	9.0055E-01
6.8760E+01	6.5957E-01	7.5327E-01	8.3671E-01	8.5808E-01	8.4308E-01
7.0990E+01	5.9747E-01	6.8951E-01	7.7326E-01	8.0069E-01	7.9024E-01
7.3230E+01	5.4227E-01	6.3214E-01	7.1550E-01	7.4811E-01	7.4178E-01
7.5470E+01	4.9321E-01	5.8057E-01	6.6304E-01	7.0006E-01	6.9742E-01
7.7700E+01	4.4962E-01	5.3428E-01	6.1548E-01	6.5625E-01	6.5693E-01
7.9940E+01	4.1091E-01	4.9276E-01	5.7244E-01	6.1642E-01	6.2008E-01
8.2170E+01	3.7654E-01	4.5558E-01	5.3357E-01	5.8031E-01	5.8667E-01
8.4410E+01	3.4601E-01	4.2227E-01	4.9849E-01	5.4764E-01	5.5648E-01
8.6650E+01	3.1885E-01	3.9241E-01	4.6682E-01	5.1814E-01	5.2928E-01
8.8880E+01	2.9469E-01	3.6564E-01	4.3825E-01	4.9154E-01	5.0490E-01
9.0000E+01	2.8362E-01	3.5332E-01	4.2504E-01	4.7926E-01	4.9370E-01
9.1120E+01	2.7319E-01	3.4167E-01	4.1251E-01	4.6765E-01	4.8316E-01
9.3350E+01	2.5405E-01	3.2020E-01	3.8935E-01	4.4626E-01	4.6390E-01
9.5590E+01	2.3700E-01	3.0097E-01	3.6851E-01	4.2717E-01	4.4693E-01
9.7830E+01	2.2183E-01	2.8378E-01	3.4981E-01	4.1021E-01	4.3209E-01
1.0006E+02	2.0834E-01	2.6845E-01	3.3310E-01	3.9524E-01	4.1924E-01
1.0230E+02	1.9637E-01	2.5482E-01	3.1825E-01	3.8215E-01	4.0828E-01
1.0453E+02	1.8578E-01	2.4275E-01	3.0510E-01	3.7080E-01	3.9904E-01
1.0677E+02	1.7642E-01	2.3209E-01	2.9355E-01	3.6105E-01	3.9139E-01
1.0901E+02	1.6818E-01	2.2275E-01	2.8346E-01	3.5281E-01	3.8521E-01
1.1124E+02	1.6098E-01	2.1462E-01	2.7478E-01	3.4600E-01	3.8044E-01
1.1348E+02	1.5470E-01	2.0759E-01	2.6736E-01	3.4048E-01	3.7692E-01
1.1571E+02	1.4927E-01	2.0156E-01	2.6109E-01	3.3612E-01	3.7455E-01
1.1795E+02	1.4462E-01	1.9646E-01	2.5589E-01	3.3285E-01	3.7323E-01
1.2019E+02	1.4071E-01	1.9223E-01	2.5170E-01	3.3059E-01	3.7290E-01
1.2242E+02	1.3747E-01	1.8882E-01	2.4845E-01	3.2928E-01	3.7345E-01
1.2466E+02	1.3487E-01	1.8617E-01	2.4608E-01	3.2885E-01	3.7482E-01
1.2689E+02	1.3287E-01	1.8423E-01	2.4451E-01	3.2922E-01	3.7692E-01
1.2913E+02	1.3143E-01	1.8295E-01	2.4369E-01	3.3033E-01	3.7970E-01
1.3137E+02	1.3053E-01	1.8229E-01	2.4353E-01	3.3206E-01	3.8309E-01
1.3360E+02	1.3013E-01	1.8218E-01	2.4395E-01	3.3435E-01	3.8703E-01
1.3584E+02	1.3022E-01	1.8263E-01	2.4495E-01	3.3719E-01	3.9149E-01
1.3807E+02	1.3080E-01	1.8364E-01	2.4655E-01	3.4063E-01	3.9643E-01
1.4031E+02	1.3186E-01	1.8519E-01	2.4870E-01	3.4461E-01	4.0184E-01

Продолжение табл. 2

Угол, град	440 нм	550 нм	675 нм	870 нм	1020 нм
1.4255E+02	1.3336E-01	1.8720E-01	2.5128E-01	3.4896E-01	4.0764E-01
1.4478E+02	1.3528E-01	1.8964E-01	2.5425E-01	3.5364E-01	4.1383E-01
1.4702E+02	1.3763E-01	1.9256E-01	2.5769E-01	3.5878E-01	4.2039E-01
1.4925E+02	1.4042E-01	1.9596E-01	2.6163E-01	3.6442E-01	4.2726E-01
1.5149E+02	1.4359E-01	1.9974E-01	2.6588E-01	3.7028E-01	4.3437E-01
1.5372E+02	1.4713E-01	2.0386E-01	2.7039E-01	3.7631E-01	4.4161E-01
1.5596E+02	1.5100E-01	2.0834E-01	2.7526E-01	3.8261E-01	4.4886E-01
1.5820E+02	1.5510E-01	2.1301E-01	2.8023E-01	3.8882E-01	4.5583E-01
1.6043E+02	1.5930E-01	2.1769E-01	2.8508E-01	3.9466E-01	4.6232E-01
1.6267E+02	1.6352E-01	2.2233E-01	2.8982E-01	4.0020E-01	4.6824E-01
1.6490E+02	1.6769E-01	2.2682E-01	2.9427E-01	4.0528E-01	4.7369E-01
1.6714E+02	1.7184E-01	2.3130E-01	2.9875E-01	4.1043E-01	4.7916E-01
1.6937E+02	1.7604E-01	2.3592E-01	3.0349E-01	4.1613E-01	4.8545E-01
1.7161E+02	1.8043E-01	2.4092E-01	3.0889E-01	4.2301E-01	4.9332E-01
1.7384E+02	1.8508E-01	2.4646E-01	3.1519E-01	4.3134E-01	5.0304E-01
1.7607E+02	1.8980E-01	2.5223E-01	3.2199E-01	4.4040E-01	5.1371E-01
1.7829E+02	1.9358E-01	2.5693E-01	3.2760E-01	4.4789E-01	5.2247E-01
1.8000E+02	1.9522E-01	2.5896E-01	3.3000E-01	4.5108E-01	5.2619E-01

Заключение. Обработаны данные измерений свойств аэрозоля на антарктической станции AERONET, Vechernaya_Hill, расположенной на белорусской антарктической станции “Гора Вечерняя”, за период наблюдений с 2008 по 2022 гг. Разработана аэрозольная модель “Вечерняя”, представляющая собой типичный аэрозоль данного региона в летний период. Наиболее вероятная и медианная оптические толщины на 550 нм составляют 0.025 и 0.027. Эти значения согласуются с рекомендованными в литературе для прибрежной зоны Антарктики. Однако другие параметры модели “Вечерняя” существенно отличаются от рекомендуемых, в том числе от стандартной модели тонкой фракции водорастворимого аэрозоля Water-soluble. В частности, альbedo однократного рассеяния для модели “Вечерняя” составляет 0.996, в то время как для рекомендованных ранее моделей (в том числе Water-soluble) находятся в интервале 0.956—0.958, что свидетельствует о существенно меньшем поглощении в реальном аэрозоле прибрежной зоны Антарктики. Такое расхождение позволяет предположить, что рекомендации, основанные на модели Water-soluble, разработанной для Северного полушария, не применимы для значительно более чистого региона Антарктики.

Модель “Вечерняя” описывает наиболее вероятное состояние аэрозоля в районе горы Вечерней и может использоваться для моделирования переноса излучения и атмосферной коррекции спутниковых данных по данному региону в отсутствие априорной информации о состоянии атмосферы.

- [1] AERONET [Electronic resource]: The Aerosol Robotic Network. Mode of acc., <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>, дата доступа 31.01.2023
- [2] A. Chaikovsky, A. Bril, O. Dubovik, B. Holben, A. Thompson, P. Goloub, N. O'Neill, P. Sobolewski, J. Bösenberg, A. Ansmann, U. Wandinger, I. Mattis. Opt. Pura Aplicada, **37** (2004) 3241—3246
- [3] B. N. Holben, T. F. Eck, I. Slutsker, D. Tanre, J. P. Buis, A. Setzer, E. Vermote, J. A. Reagan, Y. J. Kaufman, T. Nakajima, F. Lavenue, I. Jankowiak, A. Smirnov. Remote Sens. Environ., **66** (1998) 1—16
- [4] O. Dubovik, B. N. Holben, T. Lapyonok, A. Sinyuk, M. I. Mishchenko, P. Yang, I. Slutsker. Geophys. Res. Lett., **29**, N 10 (2002) 1415, doi:10.1029/2001GL014506
- [5] E. F. Vermote, D. Tanré, J. L. Deuzé, M. Herman, J.-J. Morcrette. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., **35**, N 3 (1997) 675—686, doi: 10.1109/36.581987
- [6] World Meteorological Organization. Report of WMO (CAS), Radiation Commission of IAMAP Meeting of Experts on Aerosols and their Climatic Effects, Williamsburg, Virginia, USA, 28–30 March 1983, Eds. A. Deepak, H. E. Gerber, Rep. WCP-55, Geneva (1983)
- [7] C. Tomasi, A. A. Kokhanovsky, A. Lupi, Ch. Ritter, A. Smirnov, N. T. O'Neill, R. S. Stone, B. N. Holben, S. Nyeki, Ch. Wehrli, A. Stohl, M. Mazzola, Ch. Lanconelli, V. Vitale, K. Stebel, V. Aaltonen, G. de Leeuw, E. Rodriguez, A. B. Herber, V. F. Radionov, T. Zielinski, T. Petelski, S. M. Sakerin, D. M. Kabanov, Y. Xue, L. Mei, L. Istomina, R. Wagener, B. McArthur, P. S. Sobolewski, R. Kivi, Y. Courcoux, P. Larouche, S. Broccardo, S. J. Piketh. Earth-Sci. Rev., **140** (2015) 108—157