

ФИЗИКА ИЛИМДЕРИ
ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ
PHYSICAL SCIENCES

Орозобаков А.Т., Саякбаева Б.Б., Токтосунов Э.К.

**ЫСЫК-КӨЛ ОБСЕРВАТОРИЯСЫНДА
 МИЛЛИМЕТРЛИК ТОЛКУНДАРДАГЫ ОЗОНДУН
 БИЙИКТИКТИК БӨЛҮНҮШҮН ЖЕР ҮСТҮНДӨ ӨЛЧӨӨ**

Орозобаков А.Т., Саякбаева Б.Б., Токтосунов Э.К.

**НАЗЕМНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОТНОГО
 РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОЗОНА НА МИЛЛИМЕТРОВЫХ
 ВОЛНАХ В ИССЫК-КУЛЬСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ**

A.T. Orozobakov, B.B. Sayakbaeva, E.K. Toktosunov

**GROUND-BASED MEASUREMENTS OF VERTICAL OZONE
 DISTRIBUTION ON MILLIMETER WAVEBANDS MADE
 IN THE YSSYK-KUL OBSERVATORY**

УДК: 621.372:551.508.8

Макалa кыскача, негизги деп таанылган дүйнөлүк станцияларда озон катмарына байкоо жүргүзүүгө арналган. Көбүнчө Орто Азияда жана Россияда жер үстүндөгү радиофизикалык изилдөөлөргө көңүл бурулган. Радиофизикалык өлчөөлөр коюлган милдеттерге жараша, жаан-чачын болбогон күндөрдө, булуттардын болгонуна карабастан, күнү-түнү байкоо жүргүзүүгө мүмкүнчүлүк берет. Стратосферадагы 20-60 км бийиктик чектеринде обсерваториянын үстүндөгү озондун камтылышын аныктоо миллиметрлик диапазондун радиометрикалык спектрометрин (РМС-001) жардамы менен майда толкундуу пассивдүү зонддоштуруучу ыкма менен аткарылды. Ал бул газдын айланма спектрлериндеги линиялардын бирөөсүнүн чет жакасындагы атмосфералык озондун молекулаларынын селективдүү жылуулук радионурдануусунун спектрин өлчөөгө негизделген. O_3 ($6_{0,6} \rightarrow 6_{1,5}$) молекуласынын айланма өткөөлү изилденет, анын резонанстык жыштыгы 110836 МГц. ке жакын болот. Ысык-Көл көлүнүн жээгиндеги деңиз деңгээлинен 1600 м. бийиктикте, 43° түндүк кеңдигинде, 77° чыгыш узактыгында аткарылган өлчөөлөрдүн жыйынтыктары берилди. Дүйнөлүк борборлордун маалыматтары менен салыштырылган озондун бийиктиктик бөлүнүштөрү алынды, анын максималдуу концентрациялары бар аймактары белгиленди.

Негизги сөздөр: жыштык, жутулуу, нурлануу, Добсондун бирдиктери, озон катмары, температура, нымдуулук.

Статья посвящена наблюдениям за озоновым слоем, вкратце, на основных признанных мировых станциях. В частности наземным радиофизическим исследованиям в

Средней Азии и России. Радиофизические измерения позволяют вести наблюдения круглосуточно независимо от облачности, кроме дней с осадками, в зависимости от поставленных задач. Определение содержания озона над обсерваторией в стратосфере в пределах высот 20-60 км. Выполнялось методом микроволнового пассивного зондирования с помощью радиометрического спектрометра (РМС-001) миллиметрового диапазона. Он основан на измерении спектра селективного теплового радиоизлучения молекул атмосферного озона в окрестности одной из линий вращательного спектра этого газа. Исследуется вращательный переход молекулы O_3 ($6_{0,6} \rightarrow 6_{1,5}$), резонансная частота которого близка 110836 МГц. Представлены результаты измерений, выполненные на высоте 1600 м над уровнем моря, 43° северной широты, 77° восточной долготы, на берегу оз. Иссык-Куль. Получены высотные распределения озона в сравнении с данными мирового центра, отмечены области ее максимальной концентрации.

Ключевые слова: частота, поглощение, излучение, единицы Добсона, озонный слой, температура, влажность.

The work is devoted to observations of the ozone layer on basic world stations, namely to ground-based radiophysical researches in Central Asia and Russia. Radiophysical measurements allow carrying out round-the-clock observations regardless of the cloudiness besides the days with precipitation depending on assigned tasks. The determination of the ozone content in stratosphere above the observatory at altitudes 20-60 km was performed using a method of microwave passive sensing with a radiometric spectrometer (RMS-001) of a millimeter waveband. It is based on measuring the spectrum of selective thermal radio emission of atmospheric ozone molecules in the

neighborhood of one of the lines of the rotational spectrum of this gas. The rotational transition of molecule O_3 ($6_{0,6} \rightarrow 6_{1,5}$), resonance frequency of which is close to 110836 MHz is studied. The results of measurements made on the board of lake Issyk-Kul at altitude 1600 m above sea level, 43° Northern latitude and 77° Eastern longitude are presented in the article. The ozone vertical distributions were obtained and matched with data of the World Center. The areas of its maximum concentration were marked.

Key words: frequency, absorption, radiation, Dobson units, ozone layer, temperature, humidity.

В настоящее время широко развитая сеть наземного мониторинга наряду с различными спутниковыми средствами наблюдения обеспечивают контроль изменений газового состава атмосферы в целом, в том числе озона и озонотивных составляющих атмосферы, а также ее термической структуры и других атмосферных параметров. Глобальные исследования земной атмосферы проводятся в основном со спутников, по лимбовым методам наблюдений, которые, в пространственном разрешении, менее точны по сравнению с наземными наблюдениями на стационарных пунктах.

При использовании лимбового метода каждый отчет спутникового инструмента соответствует пространственному разрешению на земной поверхности ± 350 км от точки привязки данных. Из-за этого спутниковые данные получают сглаженными вдоль

траектории полета. Кроме того, частота пролета спутника над заданным регионом невелика, что часто не позволяет решать определенные задачи, связанные с исследованием быстро протекающих атмосферных процессов.

Наземные озонотрические станции в основном объединены в мировую сеть «WMO WUODC – World Meteorological Organization World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre, Toronto, Canada».

На этих станциях измеряя интенсивности прямого или рассеянного солнечного оптического излучения в полосе поглощения озона получают данные об интегральном содержании озона во всей толще атмосферы. Комплекс, основанный на аналогичном принципе и установленный на борту спутников [1] TOMS (Total Ozone's Mapping Spectrometer – спектрометр для картирования общего содержания озона) и SBUVS (The Solar Backscatter Ultraviolet Spectrometer – спектрометр обратно рассеянного УФ солнечного излучения), позволяет в течение суток получать карты ОЗО по всему шару в любое время года. Но, как было указано выше, сглаженные, усредненные.

Наземная сеть международных станций слежения за изменением состава атмосферы, действующая под эгидой организации NDACC (бывшая NDSC), к сожалению, также весьма слабо покрывает территорию стран СНГ (рис. 1).

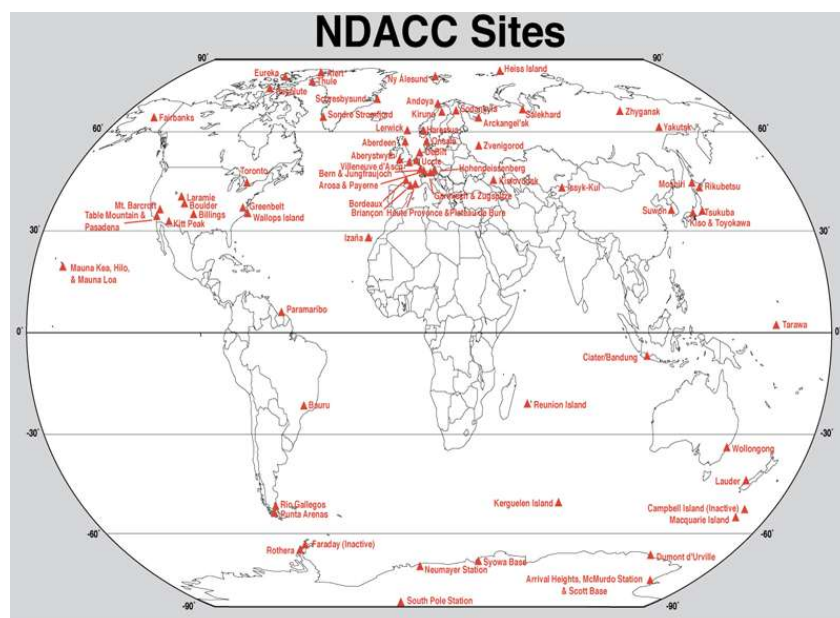


Рис. 1. Сеть наземных станций слежения за изменениями состава атмосферы.

В Киргизии за озоновым слоем ведутся наблюдения в основном на озонных и лидарных станциях, расположенных на берегу оз. Иссык-Куль, под руководством академика Токтомышева С.Ж., проф. Чен Б.Б. [2,3] и обсерватории им. проф. Орозобакова Т. За последние годы по данным этих наблюдений прослеживается постепенное восстановление содержания озона над Центральной Азией.

Радиофизические исследования в среднеазиатском регионе были начаты благодаря проектам МНТЦ №KR-634 и №KR-1527 и предыдущих бюджетных проектов [4,5].

В рамках этих проектов разработаны и изготовлены институтом прикладной физики РАН совместно с рядом организаций Нижнего Новгорода комплексы аппаратур микроволнового спектрометра РМС-001, требующих с введением времени доработок, усовершенствований.

Распределение озона над обсерваторией в стратосфере в пределах высот 20-60 км выполнялось методом пассивного зондирования на миллиметровых волнах [1]. В основе метода лежит измерение спектра селективного теплового радиоизлучения молекул атмосферного озона в окрестности одной из линий вращательного спектра этого газа, в сравнении с излучениями эталонных нагрузок.

Исследуется вращательный переход молекулы O_3 ($6_{0,6} \rightarrow 6_{1,5}$), резонансная частота которого близка 110836 МГц. Озонометрический комплекс обсерватории состоит из СВЧ-блока и блока управления, спектральных фильтров и блоков согласования с системой ввода, и обработки информации [1]. В режиме наблюдений «Черное тело – Угол – Азот» в различные интервалы времени на вход приемника поступают сигналы: от «черного тела», расположенного на обтюраторе и имеющего температуру окружающей среды;

излучение атмосферы под углом наблюдения; излучение от черного тела, находящегося при температуре кипящего азота. Принятый антенной [1] сигнал 2,7-мм диапазона преобразуется смесителем приемника в сигнал промежуточной частоты ПЧ1 в диапазоне 1250...1800 МГц, который далее усиливается включенными последовательно маломощным усилителем МШУ ($N_{ш} \sim 1$ дБ, $K_p = 34,5$ дБ) и УПЧ ($N_{ш} \sim 3$ дБ, $K_p = 29$ дБ).

Блок ММ включает в себя рупорную антенну, плату приемника с СВЧ узлами приемного и гетеродинного трактов, синтезатор, стабилизаторы питающих напряжений - СН, генератор НЧ управляющего напряжения [6].

С выхода блока ММ сигнал диапазона ПЧ1 преобразуется в цифровую и поступает на вход ПЭВМ, где методом подбора параметров заданной модели озонового слоя путем минимизации среднеквадратичных разностей измеренных спектров и рассчитанных по восстановленным профилям озона определяется высотное распределение озона. Измерения выполняются на высоте 1600 м над уровнем моря, 43° северной широты, 77° восточной долготы, на берегу оз. Иссык-Куль в окружении гор. В направлении антенны высотой 2000-3000 км на удалении 200-300 км ширина озера 70 км и угол направленности антенны 16° позволяет вести наблюдения независимо от горных преград. Радиофизические измерения позволяют вести наблюдения круглосуточно независимо от облачности, кроме дней с осадками, в зависимости от поставленных задач. В результате измерений были получены спектры поглощения, в линии озона с резонансной частотой 110836 МГц. По данным спектрам, которых в течении часа набирается около 12-ти определяются концентрация озона по высоте и содержания стратосферного озона.

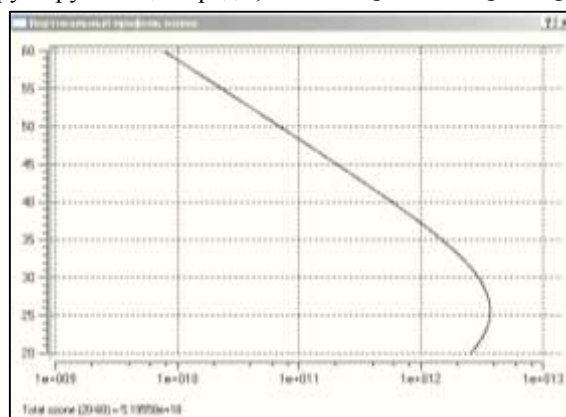


Рис. 2. Высотное распределение озона 21.08.19 в течение 10:49-11:44.

На рисунке два представлен результат обработки одного такого сеанса измерений, по которому можно определить суммарный озон в стратосфере в пределах высот 20-60 км, зоны максимальной его концентрации. В данном случае это – 193 единиц Добсона (1 е.Д. $\approx 2.7 \cdot 10^{16}$ молекул /см²) и 25.5-26.2 км. За другие дни данные дневных и ночных измерений о содержании озона в слоях 20-30 и 30-60 км приведены в таблице 1.

По данным мировой сети наземных станций над

районом измерений обсерватории общее содержание озона составляет около 290-320 е.Д. А по данным обсерватории в пределах высот 20-60 км озона содержится 65-75% от всего ОСО. Известно, что в низких широтах основной максимум озонового слоя находится выше чем в верхних [7]. В нашем случае наиболее насыщенным озоном является интервал высот 22-35 км, что подтверждается многолетними наблюдениями.¹

Таблица 1

Высотное распределение озона по данным обсерватории

Дата	14.09.18		15.09.18	16.09.18	16.09.18
Н / км	17:30-18:20	20:35-21:57	18:40-19:58	10:52-11:42	11:50-12:58
20	2.394e+012	2.607e+012	2.467e+012	2.344e+012	2.353e+012
21	2.737e+012	2.962e+012	2.804e+012	2.666e+012	2.676e+012
22	3.069e+012	3.301e+012	3.126e+012	2.974e+012	2.984e+012
23	3.368e+012	3.599e+012	3.409e+012	3.245e+012	3.256e+012
24	3.609e+012	3.832e+012	3.631e+012	3.457e+012	3.469e+012
25	3.770e+012	3.978e+012	3.770e+012	3.590e+012	3.603e+012
26	3.835e+012	4.023e+012	3.814e+012	3.631e+012	3.644e+012
27	3.797e+012	3.962e+012	3.756e+012	3.576e+012	3.589e+012
28	3.660e+012	3.802e+012	3.604e+012	3.430e+012	3.443e+012
29	3.437e+012	3.558e+012	3.373e+012	3.208e+012	3.221e+012
30	3.151e+012	3.252e+012	3.082e+012	2.930e+012	2.943e+012
31	2.825e+012	2.909e+012	2.757e+012	2.618e+012	2.631e+012
32	2.483e+012	2.554e+012	2.419e+012	2.296e+012	2.307e+012
33	2.144e+012	2.204e+012	2.087e+012	1.979e+012	1.990e+012
34	1.824e+012	1.874e+012	1.775e+012	1.681e+012	1.691e+012
35	1.531e+012	1.575e+012	1.490e+012	1.410e+012	1.419e+012
36	1.272e+012	1.309e+012	1.239e+012	1.171e+012	1.178e+012
37	1.047e+012	1.079e+012	1.021e+012	9.637e+011	9.702e+011
38	8.554e+011	8.829e+011	8.348e+011	7.876e+011	7.932e+011
39	6.946e+011	7.183e+011	6.789e+011	6.399e+011	6.446e+011
40	5.613e+011	5.816e+011	5.495e+011	5.175e+011	5.214e+011
41	4.518e+011	4.691e+011	4.431e+011	4.169e+011	4.202e+011
42	3.625e+011	3.772e+011	3.561e+011	3.348e+011	3.375e+011
43	2.901e+011	3.025e+011	2.855e+011	2.682e+011	2.704e+011
44	2.317e+011	2.422e+011	2.285e+011	2.144e+011	2.163e+011
45	1.847e+011	1.935e+011	1.825e+011	1.711e+011	1.727e+011
46	1.471e+011	1.545e+011	1.456e+011	1.364e+011	1.377e+011
47	1.170e+011	1.232e+011	1.161e+011	1.087e+011	1.097e+011
48	9.297e+010	9.812e+010	9.245e+010	8.647e+010	8.731e+010
49	7.384e+010	7.812e+010	7.358e+010	6.877e+010	6.945e+010
50	5.861e+010	6.217e+010	5.853e+010	5.466e+010	5.522e+010
51	4.651e+010	4.945e+010	4.654e+010	4.343e+010	4.388e+010
52	3.689e+010	3.932e+010	3.700e+010	3.449e+010	3.486e+010
53	2.926e+010	3.126e+010	2.940e+010	2.739e+010	2.769e+010
54	2.320e+010	2.484e+010	2.336e+010	2.175e+010	2.199e+010
55	1.839e+010	1.974e+010	1.856e+010	1.726e+010	1.746e+010
56	1.457e+010	1.569e+010	1.474e+010	1.370e+010	1.386e+010
57	1.155e+010	1.246e+010	1.171e+010	1.087e+010	1.100e+010
58	9.153e+009	9.901e+009	9.297e+009	8.627e+009	8.732e+009
59	7.253e+009	7.865e+009	7.383e+009	6.846e+009	6.930e+009
60	5.747e+009	6.247e+009	5.862e+009	5.432e+009	5.500e+009
X(20 - 60) км	198	206	196	186	187
Hmax	26.130	25.925	25.930	25.925	25.930

Дата	19.08.19		21.08.19		22.08.19	23.08.19
Н / км	14:35-15:34	15:34-15:59	10:49-11:44	11:52-12:51	10:16-11:07	12:13-13:17
20	2.047e+012	2.066e+012	2.326e+012	2.268e+012	2.391e+012	2.525e+012
21	2.358e+012	2.381e+012	2.656e+012	2.595e+012	2.716e+012	2.888e+012
22	2.668e+012	2.695e+012	2.974e+012	2.915e+012	3.026e+012	3.242e+012
23	2.959e+012	2.989e+012	3.261e+012	3.206e+012	3.297e+012	3.563e+012
24	3.209e+012	3.241e+012	3.492e+012	3.445e+012	3.508e+012	3.826e+012
25	3.398e+012	3.431e+012	3.648e+012	3.612e+012	3.640e+012	4.007e+012
26	3.508e+012	3.540e+012	3.712e+012	3.689e+012	3.678e+012	4.089e+012
27	3.527e+012	3.556e+012	3.679e+012	3.670e+012	3.619e+012	4.063e+012
28	3.454e+012	3.479e+012	3.550e+012	3.555e+012	3.470e+012	3.932e+012
29	3.295e+012	3.316e+012	3.341e+012	3.357e+012	3.244e+012	3.709e+012
30	3.068e+012	3.082e+012	3.069e+012	3.095e+012	2.962e+012	3.415e+012
31	2.791e+012	2.800e+012	2.758e+012	2.790e+012	2.648e+012	3.076e+012
32	2.486e+012	2.491e+012	2.430e+012	2.465e+012	2.322e+012	2.715e+012
33	2.174e+012	2.175e+012	2.104e+012	2.139e+012	2.002e+012	2.354e+012
34	1.870e+012	1.868e+012	1.794e+012	1.828e+012	1.702e+012	2.010e+012
35	1.586e+012	1.582e+012	1.511e+012	1.542e+012	1.428e+012	1.694e+012
36	1.329e+012	1.324e+012	1.258e+012	1.286e+012	1.187e+012	1.412e+012
37	1.103e+012	1.097e+012	1.038e+012	1.063e+012	9.775e+011	1.166e+012
38	9.075e+011	9.019e+011	8.505e+011	8.715e+011	7.994e+011	9.560e+011
39	7.417e+011	7.362e+011	6.925e+011	7.102e+011	6.500e+011	7.787e+011
40	6.028e+011	5.977e+011	5.610e+011	5.757e+011	5.260e+011	6.310e+011
41	4.877e+011	4.830e+011	4.527e+011	4.648e+011	4.241e+011	5.093e+011
42	3.931e+011	3.889e+011	3.640e+011	3.740e+011	3.409e+011	4.096e+011
43	3.160e+011	3.122e+011	2.920e+011	3.001e+011	2.733e+011	3.286e+011
44	2.533e+011	2.501e+011	2.337e+011	2.403e+011	2.187e+011	2.630e+011
45	2.027e+011	1.999e+011	1.868e+011	1.921e+011	1.747e+011	2.102e+011
46	1.620e+011	1.596e+011	1.491e+011	1.533e+011	1.394e+011	1.677e+011
47	1.293e+011	1.272e+011	1.188e+011	1.222e+011	1.111e+011	1.337e+011
48	1.031e+011	1.013e+011	9.464e+010	9.738e+010	8.847e+010	1.065e+011
49	8.211e+010	8.066e+010	7.532e+010	7.752e+010	7.041e+010	8.475e+010
50	6.537e+010	6.416e+010	5.992e+010	6.168e+010	5.601e+010	6.741e+010
51	5.202e+010	5.101e+010	4.765e+010	4.905e+010	4.454e+010	5.360e+010
52	4.138e+010	4.054e+010	3.787e+010	3.899e+010	3.540e+010	4.260e+010
53	3.291e+010	3.221e+010	3.010e+010	3.099e+010	2.813e+010	3.385e+010
54	2.616e+010	2.558e+010	2.391e+010	2.462e+010	2.235e+010	2.689e+010
55	2.079e+010	2.032e+010	1.900e+010	1.956e+010	1.776e+010	2.136e+010
56	1.653e+010	1.613e+010	1.509e+010	1.554e+010	1.410e+010	1.696e+010
57	1.313e+010	1.281e+010	1.198e+010	1.234e+010	1.120e+010	1.347e+010
58	1.043e+010	1.017e+010	9.515e+009	9.799e+009	8.896e+009	1.069e+010
59	8.290e+009	8.071e+009	7.555e+009	7.782e+009	7.065e+009	8.490e+009
60	6.586e+009	6.406e+009	5.999e+009	6.179e+009	5.610e+009	6.740e+009
20-60	5.050	5.073	5.180	5.187	5.071	5.733
X(20-60)км	188	189	193	194	189	213
Nmax	26.705	26.674	26.157	26.301	25.894	26.261

Результаты микроволновых измерений Иссык-Кульской обсерватории с целью верификации сравниваются с данными других наземных станций или данными мировой сети (рис. 3а, 3б.).

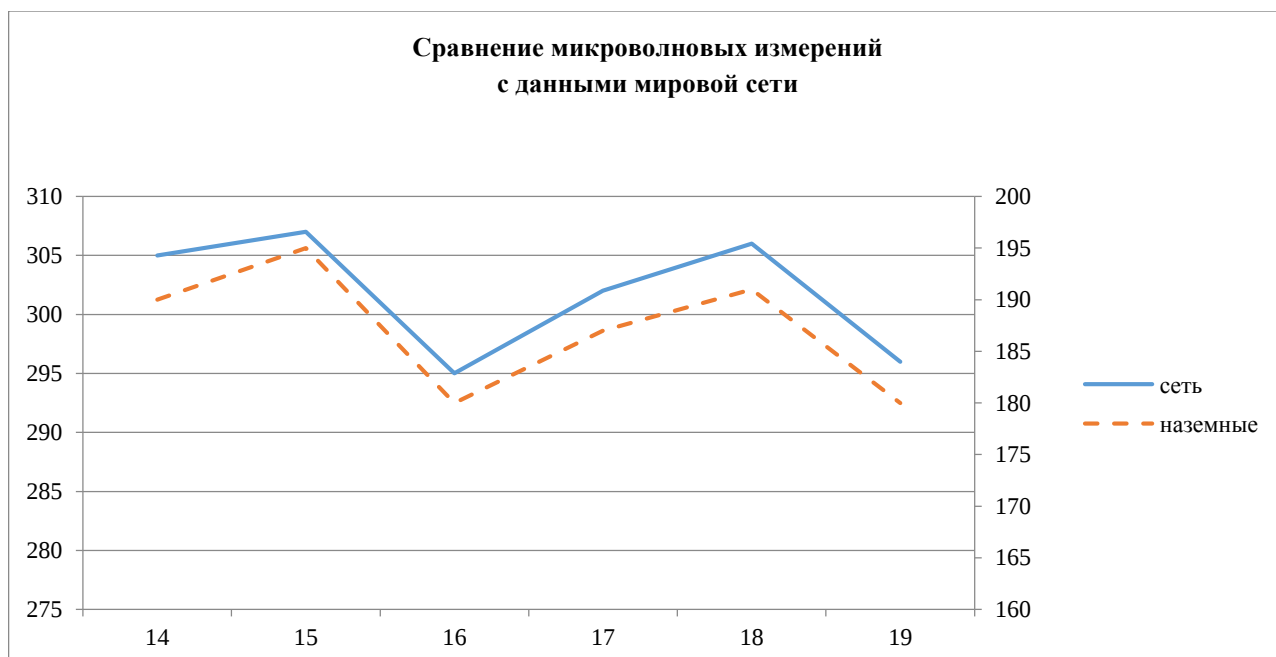


Рис. 3а. Результаты наземных измерений обсерватории с данными мировой сети, август 2018 г.

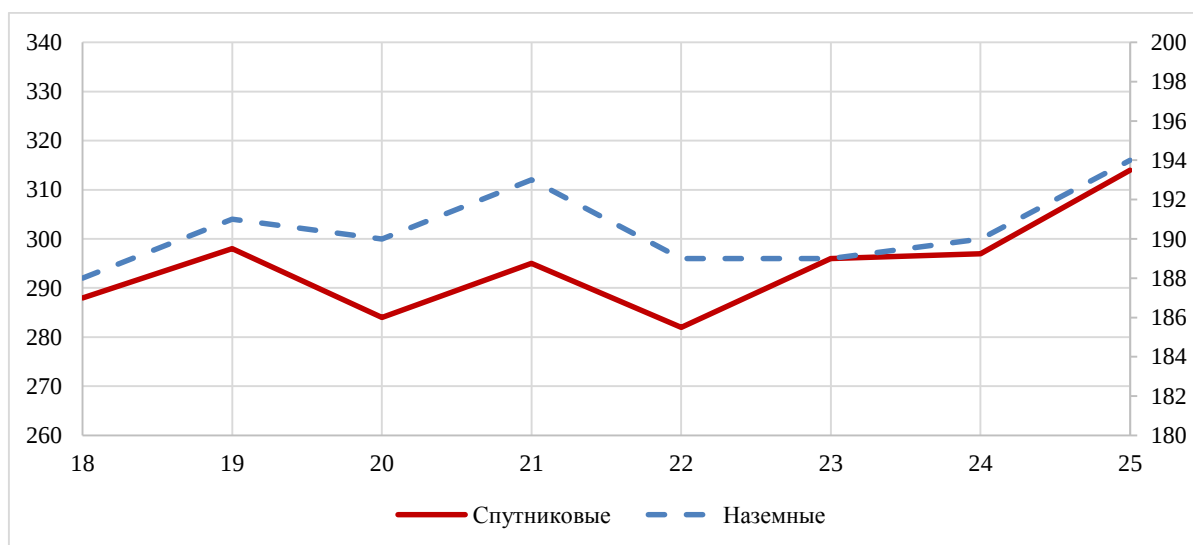


Рис. 3б. Результаты микроволновых измерений в сравнении с орбитальными данными, август 2019 г.

На рисунках три представлены некоторые типичные сравнения измерений общего содержания озона и содержания озона в пределах высот 20-60 км. По рисункам видно, максимальное общее содержание озона в летний период за оба года составляет 305-310 ед. Д., а в интервале высот 20-60 км около 194-196. Выше представлены обычные измерения проводящиеся в Иссык-Кульской обсерватории им. проф.

Орозобакова Т., которые проводятся круглогодично, сезонно в зависимости от поставленных задач, круглосуточно. Данные измерения востребованы в связи с необходимостью определения высотного распределения озона в данном регионе. Они позволяют определять области максимальной концентрации озона по высоте, которые и являются основными в защите от ультрафиолета. А также известно, что наиболее

подверженными влиянию техногенных воздействий является озонный слой, расположенный в верхней стратосфере. Измерения в обсерватории также позволяют следить за вариациями содержания озона и в данной области. Измерения последних 10-15 лет не подтвердили значительных уменьшений содержания озона по сравнению с 80-ми годами прошлого века.

Литература:

1. Орозобаков А.Т., Саякбаева Б.Б., Орозобаков Э.У. Наземные радиофизические наблюдения высотного распределения озона над регионом Средней Азии. // Журнал радиоэлектроники, №12, 2018. - С. 1-13.
2. Токтомышев С.Ж., Семенов В.К. Озоновые дыры и климат горного региона Центральной Азии. - Istanbul: Surat Gorsel Sanatbar Merkezi, 2001. – 215 с.
3. Чен Б.Б. Лидарные исследования оптики и микрофизики аэрозоля. // Вестник КРСУ, 2008. - Т.8. - №10. - С. 134-148
4. Орозобаков Т.О., Орозобаков А.Т., Кисляков А.Г., Вдовин В.Ф., Зинченко И.И., Красильников А.А., Куликов Ю.Ю., Носов В.И., Носова Е.В., Рыскин В.Г., Шкелев Е.И., Орехов Ю.И., Хохрин Л.П. Обсерватория для мониторинга озонового слоя Земли в миллиметровом диапазоне длин волн в Среднеазиатском регионе. // Вестник ННГУ, Серия Радиофизика, 2007. - №6. - С. 44-51.
5. Орозобаков Т. Орозобаков А.Т., Саякбаева Б.Б. Восстановление высотного распределения озона над Иссык-Кульской котловиной по данным радиометрического спектрометра (РМС-001) // Труды Международной науч.-техн. конференции «Альтернативная энергетика и проблемы энергобезопасности». - Бишкек, 22-24 апр. 2008 г. - Бишкек, 2008. - С.151-158.
6. Рыскин В.Г., Орозобаков А.Т. Микроволновые наземные измерения суточных вариаций озона в верхней стратосфере над Киргизией. // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. - Т.51. - №1. - 2015. - С.88-95.
7. Орозобаков Т., Орозобаков А.Т., Саякбаева Б.Б. Модернизация радиоспектрометра РМС-001 и результаты сезонных наблюдений озонового слоя 2009 года. // Журнал «Известия вузов, №3. - Б., 2010. - С. 10-12.