

УДК 621.372:551.508.8

Орозобаков Ж.А.

инженер Института физики им. академика Ж.Ж.Жеенбаева Национальной академии наук Кыргызской Республики, 720071, Бишкек

Орозобаков А.Т.

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник 720071, Бишкек, 996 554400106, email:a.orozobakov@mail.ru

Саякбаева Б.Б.

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института физики им. академика Ж.Ж.Жеенбаева Национальной академии наук Кыргызской Республики, 720071, Бишкек email:sayakbaeva79@gmail.com

Орозобаков Ж.А., инженер

Орозобаков А.Т.

физика-математика илимдеринин кандидаты,
улук илимий кызматкери

Саякбаева Б.Б.

физика-математика илимдеринин кандидаты

Orozobakov Zh.A.

engineer

Orozobakov A.T.

candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher

Sayakbaeva B.B.

candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher

*Институт физики им. академика Ж.Ж.Жеенбаева Национальной академии наук
при Президента Кыргызской Республики*

*Кыргыз Республикасынын Президентине караштуу Улуттук илимдер академиясынын
академик Ж.Жеенбаев атындагы Физика институту*

*Institute of Physics named after Academician Zh. Zheenbaev of the National Academy
of Sciences of the Kyrgyz Republic*

**РАСЧЕТ ВЫСОТНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СТРАТОСФЕРНОГО ОЗОНА
НАД КЫРГЫЗСТАНОМ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ МИКРОВОЛНОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

**КЫРГЫЗСТАНДЫН ҮСТҮНДӨ СТРАТОСФЕРАЛЫК ОЗОНДУН БИЙИКТИК БОЮНЧА
БӨЛҮШТҮРҮЛҮШҮН ЖЕР ҮСТҮНДӨГҮ МИКРОТОЛКУНДУУ ӨЛЧӨӨЛӨРДҮН
МААЛЫМАТТАРЫ БОЮНЧА ЭСЕПТӨӨ**

**CALCULATION OF THE ALTITUDE DISTRIBUTION OF STRATOSPHERIC OZONE OVER
KYRGYZSTAN BASED ON GROUND-BASED MICROWAVE MEASUREMENTS**

Аннотация. В статье представлены принципы приема и распространения излучений вращательного перехода молекул озона на терагерцовых частотах, применяемых в обсерватории. Указаны оба метода микроволновых измерений по абсолютной и атмосферной калибровкам. Результаты наземных измерений по абсолютной калибровке соответствуют данным измерений орбитальных инструментов, эталонным данным. По атмосферной калибровке подобран коэффициент корреляции. Приведены результаты расчетов по данным

измерений для средних значений сезонного хода содержания озона. Для наглядности показан сезонный ход содержания озона над северным Кыргызстаном за последний год в сравнении с годом первых измерений в обсерватории. Как обычно наблюдаются весенний максимум и осенний минимум содержания озона, характерный для средних широт.

Ключевые слова: стратосферный озон, абсолютная калибровка, измерение, частота, миллиметровые волны, излучение.

Аннотация. Бул макалада обсерваторияда колдонулган терагерц жыштыктарында озон молекуласынын айланма өтүү нурлануусун кабыл алуу жана жайылтуу принциптери берилген. Абсолюттук жана атмосфералык калибрлөөлөрдү колдонуу менен микротолкундуу өлчөө ыкмаларынын экөө тең берилген. Абсолюттук калибрлөөнүн негизинде жер үстүндөгү өлчөөлөр орбиталык приборлордон алынган өлчөөлөргө жана маалымдама маалыматтарына туура келет. Атмосфералык калибрлөөнүн негизинде корреляция коэффициенти аныкталган. Озондун мазмунунун сезондук өзгөрүшүнүн орточо маанисин өлчөө маалыматтарына негизделген эсептөөлөрдүн натыйжалары келтирилген. Түшүнүктүү болуу үчүн, өткөн жылдагы Кыргызстандын түндүгүндөгү озондун мазмунунун сезондук өзгөрүүсү обсерваторияда биринчи өлчөөлөр жүргүзүлгөн жылга салыштырмалуу көрсөтүлгөн. Адаттагыдай эле, озондун курамында жазгы максимум жана күзгү минимум байкалат, бул орто кеңдиктер үчүн мүнөздүү.

Негизги сөздөр: стратосфералык озон, абсолюттук калибрлөө, өлчөө, жыштык, миллиметрдик толкундар, радиация.

Annotation. The article presents the principles of reception and propagation of radiation from the rotational transition of ozone molecules at terahertz frequencies used in the observatory. Both methods of microwave measurements with absolute and atmospheric calibrations are given. The results of ground-based measurements for absolute calibration correspond to the measurement data of orbital instruments, the reference data. The correlation coefficient was selected based on atmospheric calibration.

The results of calculations based on measurement data for average values of the seasonal variation of ozone content are presented. For clarity, the seasonal variation of ozone content over northern Kyrgyzstan over the past year is shown in comparison with the year of the first measurements at the observatory. As usual, a spring maximum and autumn minimum in ozone content are observed, typical for mid-latitudes.

Keywords: stratospheric ozone, absolute calibration, measurement, frequency, millimeter waves, radiation.

Микроволновые измерения высотного распределения озона в обсерватории “Иссык-Куль” им. проф. Орозобакова Т. проводятся на миллиметровых волнах на длине волны 2.7мм, терагерцовых частотах 110836МГц. По свойствам такие волны считаются схожими с оптическими. С точки зрения физики, различие между радиодиапазоном, ИК и видимым светом условно - все это электромагнитные

волны, и многие оптические эффекты проявляются в СВЧ и миллиметровом диапазоне (интерференция, поглощение, излучение, спектры...) [1,2]. Спектральная аппаратура измеряющая оптические свойства атмосферы, разработанная в рамках проектов МНТЦ под руководством сотрудников обсерватории [3,4], рассчитана на проведение наземных измерений по атмосферной и абсолютной калибровкам рис.1.

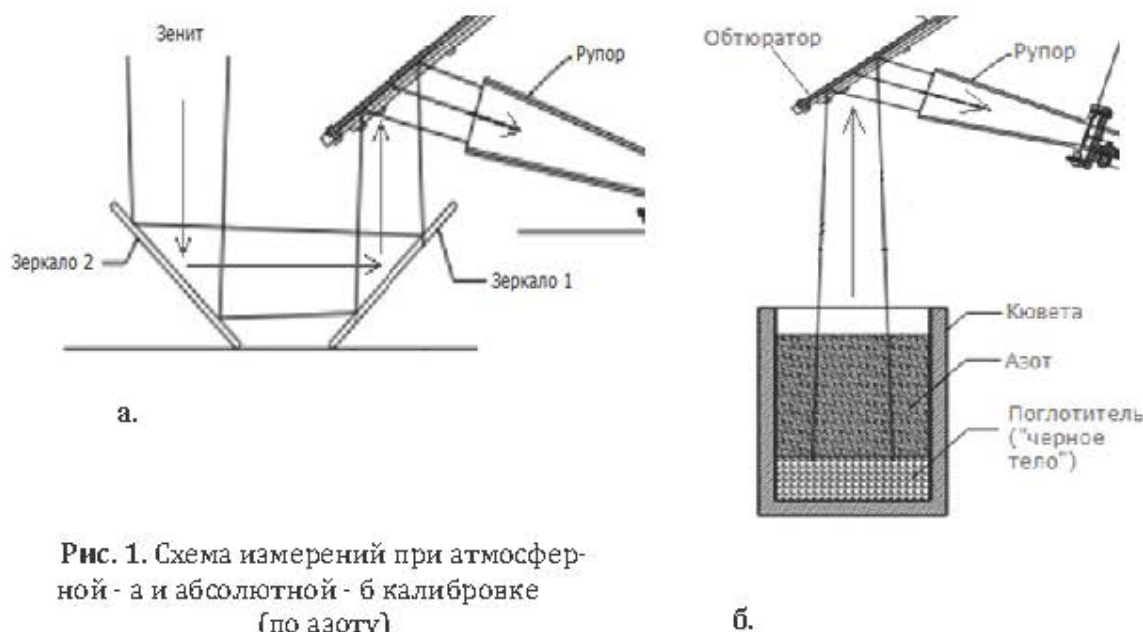


Рис. 1. Схема измерений при атмосферной - а и абсолютной - б калибровке (по азоту)

Как видно из рисунка 1а излучение зенита до приемника отражается от трёх отражающих поверхностей, поэтому вряд ли на приемник попадает нулевое зенитное излучение. Но можно утверждать, что некое постоянное излучение принимается. Тем более достаточное количество измерений подтверждает корреляцию с эталонными измерениями. За эталонные измерения прини-

маются спутниковые [5], которым соответствуют наземные измерения обсерватории по абсолютной калибровке рис.1б.

На приемное устройство как при атмосферной калибровке (по зениту), так и по абсолютной (по азоту) поступают одинаковые сигналы от сектора обтюратора с черным телом и с угла излучения атмосферы через пустой сектор рис.2.

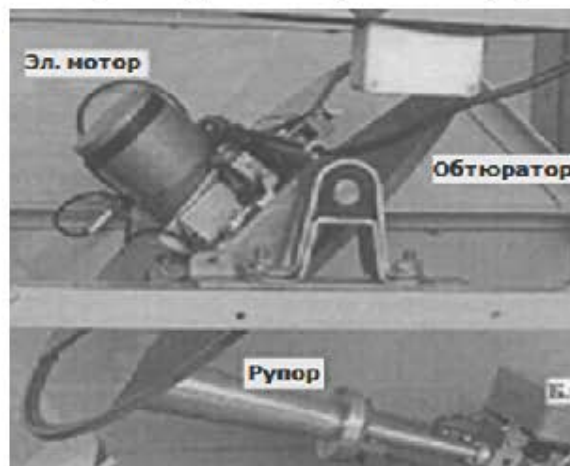


Рис. 2. Часть спектрометра, отвечающая за селективный прием в разобранном виде

Разница калибровок заключается в приеме излучений от зенита и от черного тела при температуре кипящего жидкого азота, с которыми в конечном счёте сравнивая искомое излучение получают профили озона.

Метод абсолютной калибровки интен-

сивности спектра излучения выполняется с использованием в качестве калибровочных сигналов излучения «теплой» и «холодной» эталонных нагрузок. То есть эффективная температура на входе приемника в каждом частотном канале спектро радиометра равна:

$$T_E(v, \theta) = T_H - (T_H - T_C) \frac{Y_H(v) - Y_E(v)}{Y_H(v) - Y_C(v)}, \quad (1)$$

где T_H и T_C – температуры теплой и холодной нагрузок, находящиеся при температуре окружающего воздуха и при температуре кипящего азота (77 К) соответственно; $Y_H(v)$, $Y_C(v)$ и $Y_E(v)$ – отсчеты на детекторе каждого канала спектро радиометра, пропорциональные температурам излучения теплой, холодной нагрузок и температуре излучения атмосферы соответственно.

Вычисление интенсивности излучения, связанной, собственно, с озоном, осуществляется разностным методом, т.е. определяется разность температур для каждого спектрального канала относительно опорного канала с учетом тропосферного ослабления:

$$\Delta T_{oz}(v, \theta) = [T_E(v, \theta) - T_E(v_R, \theta)] \exp[\tau_T \sec \theta] \quad (2)$$

где ν_R – частота опорного канала, который является одним из спектральных каналов, максимально удаленный от резонансной частоты ν_3 . Величина тропосферного ослабления в направлении зенита τ_T рассчитывается, используя выражение

$$\tau_T = - \frac{1}{\sec \theta} \ln \left[1 - \frac{T_{ET}(\theta)}{bT_0} \right]$$

, где $T_{ET}(\theta)$ – эффективная температура излучения тропосферы в направлении θ . Эта величина измеряется также с помощью методики абсолютной калибровки и вычисляется согласно выражению (1). И выражение для оптической толщины в линии поглощения озона:

$$\tau_{oz}(v) = - \frac{1}{\sec \theta} \ln \left[1 - \frac{T_E(v, \theta) - T_{ET}(\theta)}{\bar{T}_{oz}(v) \left[1 - \frac{T_{ET}(\theta)}{bT_0} \right]} \right] \quad (3)$$

Эта величина, представляющая спектр поглощения атмосферного озона, используется в дальнейшем для определения количества этого газа на луче зрения.

Аналогичное выражение можно получить, применив метод атмосферных «разрезов», основанный на задании

плоскостной двухслойной модели атмосферы, где для калибровки интенсивности спектральной линии озона используется собственное излучение атмосферы под различными зенитными углами. В этом случае последовательно регистрируются следующие спектры:

1. спектр излучения черного тела, находящегося при температуре окружающего воздуха T_0 , при этом выходной сигнал на детекторе каждого канала анализатора спектра пропорционален T_0 :

$$a_0(v) \sim T_0;$$

2. спектры излучения атмосферы в направлении зенитных углов θ_1 и θ_2 , выходные сигналы соответственно равны:

$$a_{1,2}(v, \theta_{1,2}) \sim$$

$$bT_0(1 - e^{-\tau_T \sec \theta_{1,2}}) + \bar{T}_{oz}(v)(1 - e^{-\tau_{oz}(v) \sec \theta_{1,2}})e^{-\tau_T \sec \theta_{1,2}}$$

Учитывая, что рассеяние рупорной антенны мало (<5%), им можно пренебречь в относительных измерениях. Составив отношения и обозначив $A_1 = \sec \theta_1$, $A_2 = \sec \theta_2$, можно получить выражение для искомой величины поглощения атмосферного озона в направлении зенита $\tau_{oz}(v)$:

$$\tau_{oz}(v) = \frac{A_1 - A_2 \delta}{A_1^2 - \delta A_2^2} - \sqrt{\left(\frac{A_2 \delta - A_1}{A_1^2 - \delta A_2^2} \right)^2 - 2 \frac{bT_0}{\bar{T}_{oz}(v)} \cdot \frac{\gamma - \delta}{A_1^2 - \delta A_2^2}} \quad (4)$$

При выводе (4) было использовано разложение по малому параметру $\tau_{oz}(v) \sec \theta$, в котором отброшены все члены старше квадратичного, так как обычно величина $\tau_{oz}(v) \ll 1$, а $\sec \theta \leq 5$. Тропосферное ослабление τ_T вычислялось по формуле:

$$\tau_T = \frac{1}{A_1 - A_2} \ln \frac{a_2 - a_0}{a_1 - a_0} \quad (5)$$

где отсчеты a_0 , a_1 и a_2 аналогичны ранее принятым обозначениям для спектральных каналов.

Ряд проведенных наземных измерений по обеим калибровкам показали - коэффициент корреляции со спутниковыми данными составлял 0.97-0.98. Независимо от облачности, времени суток, сезона между спутниковыми измерениями и наземными по обеим калибровкам всегда была четкая корреляция рис.3.

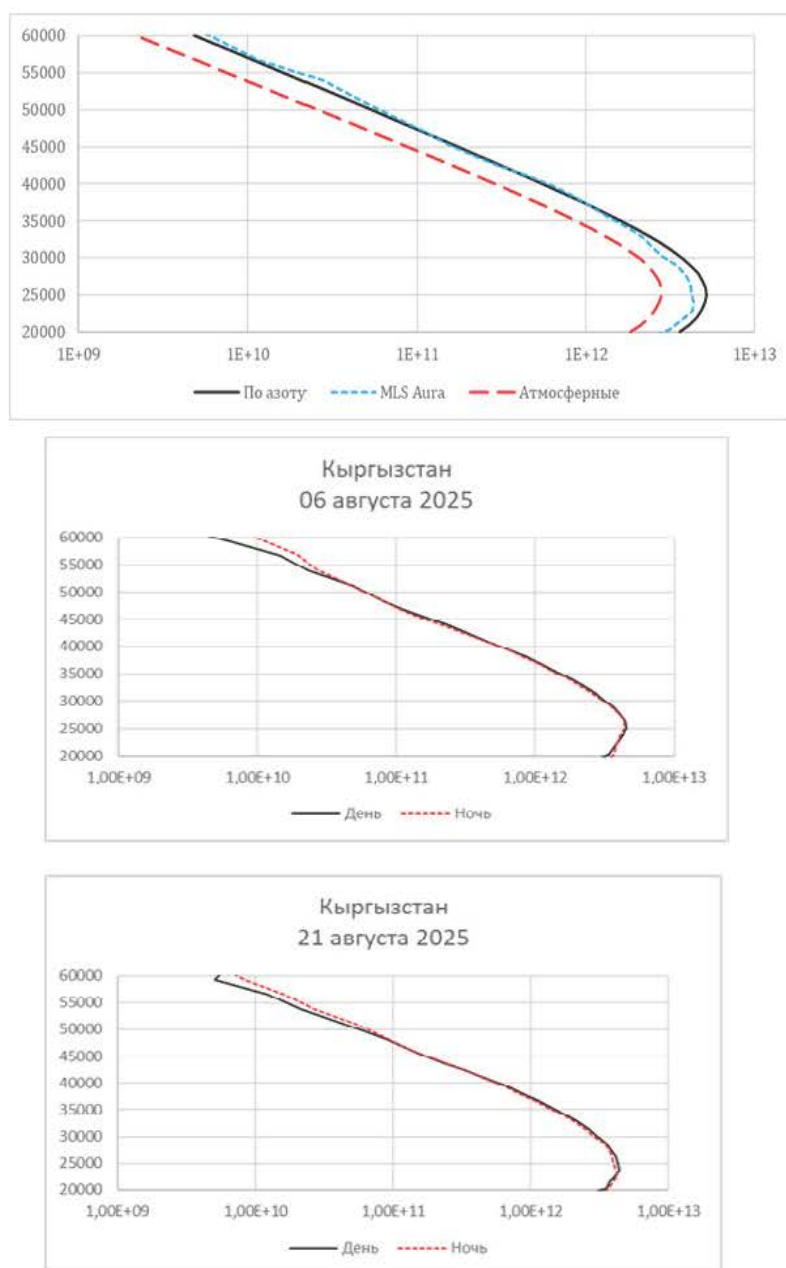


Рис. 3. Профили озона по различным калибровкам и спутниковым данным: а -сравнение по трем измерениями; б, в - по расчетам спутниковых данных

По рисунку 3а видно, что расчеты по измерениям при абсолютной калибровке соответствуют спутниковым данным. Максимальные концентрации озона в обоих случаях как обычно в районе 25 км, и составили от 3 до $5e+12$ мол/см³. Вообще длительные измерения показывают что в столбце 20-60 км с сечением в один сантиметр находится около 70% всего озона - 200-220 единиц Добсона, это около $5.2-6.1e+18$ мол/см² (1 е.Д. $\approx 2.687e+16$ молекул/см²). Здесь показано высотное распределение озона за один

день. При наземных измерениях собираются данные за один час и усредняются. Пока приемник один и рупорная антенна одна и если в конструкции на выходе уменьшить или увеличить механически поступающий сигнал, то однозначно поставятся под сомнения и измерения по абсолютной калибровке. Поэтому на данном этапе решаются вопросы по определению коэффициента корреляции, так как многолетние наблюдения свидетельствовали о подобии профилей озона по разным калибровкам, четко прослеживалась

взаимосвязь с высотой. Последние измерения также показали - общее содержание озона по атмосферной калибровке в пределах высот 20-60 км оказывается всегда меньше на 25-35 процентов чем на самом деле, при коэффициенте корреляции - 0,98. После

длительных экспериментальных работ подтвержден коэффициент подобия - 1,35. На рисунке 4 представлены графики распределения озона по различным калибровкам в сравнении со спутниковыми данными с коэффициентом корреляции.

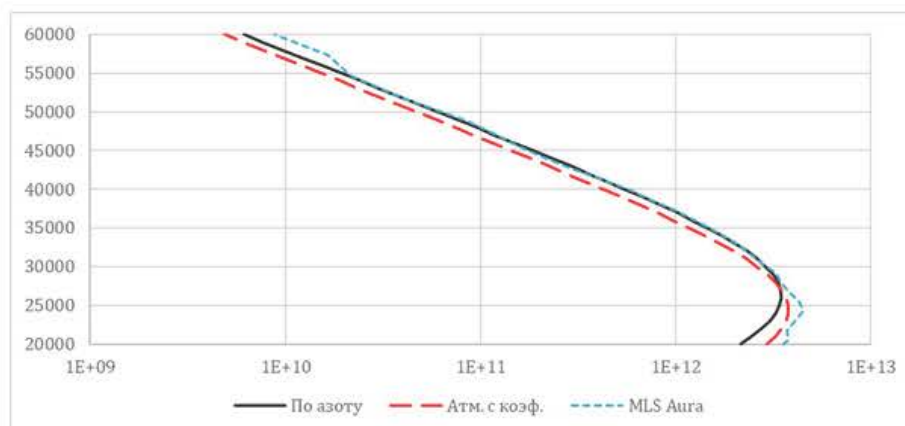


Рис. 4. Высотное распределение озона с применением коэффициента к измерениям по зениту

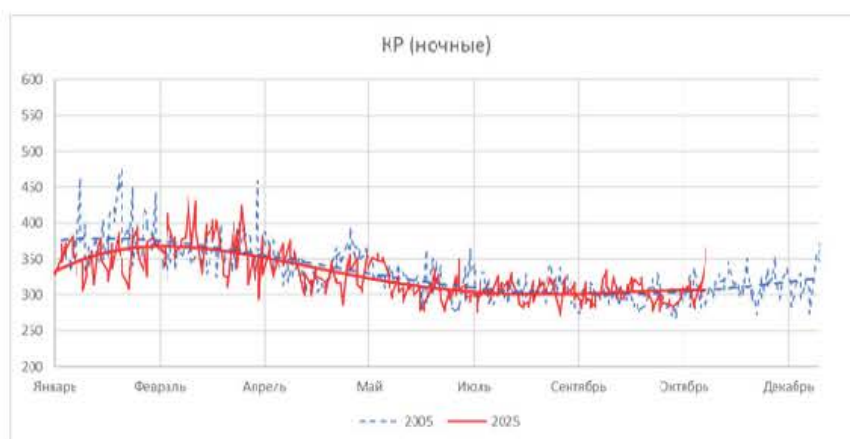
Независимо от сезона по данным и спутниковых измерений и наземных максимальная концентрация озона находится в районе высот 24-26 км.

А содержание озона в пределах высот 20-60 км составляет около 70%.

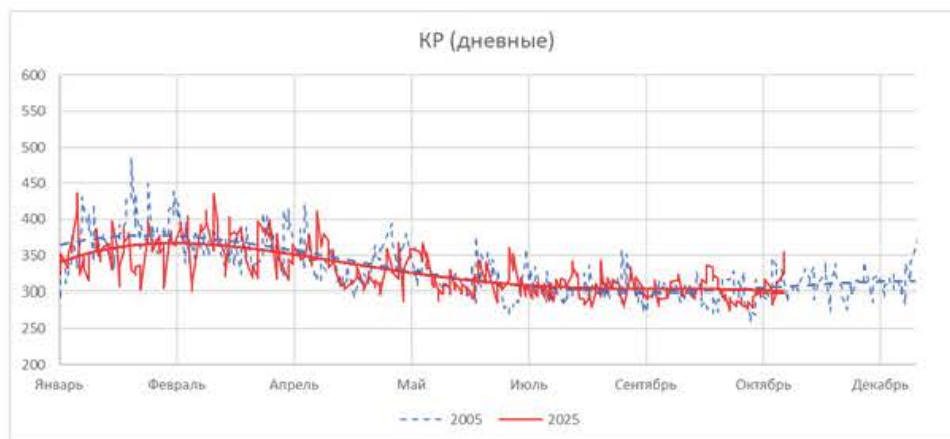
На рисунках 5 представлены данные

спутниковых измерений общего содержания озона в течение года в сравнении с 2005 годом, а также за день, месяц. Где показания специально разделили на дневные и ночные, чтобы как-то различать слишком много данных на рисунках визуально. Рекомендованный сектор поиска пролетов над Кыргызстаном составляет 40-46 с.ш. и 72-82 в.д..

а



б



в



г



Рис. 5. Расчет содержаний озона по данным инструментов спутника MLS
Aura

Здесь как обычно прослеживается весенний максимум 320-350 ед.Д. и осенний минимум 280-300 ед.Д. содержания озона над районом наземных измерений обсерватории. Что соответствует распределению озона в средних широтах. Многолетние микровол-

новые измерения подтвердили соответствие полученных результатов эталонным, спутниковым данным. Выше представлены сравнения для средних значений сезонного хода содержания озона (июль, август), в другие периоды [6,7] наземные измерения также соответствовали спутниковым данным.

Литература

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики, Наука, Москва, 1973, с.723.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц В.М. Теория поля, Наука, Москва, 1973, с.504.
3. 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 Центральноазиатском регионе //Известия НАН КР, Бишкек, 2008, №1, с. 44-53.
4. Орозобаков Т.О., Зинченко И.И., Рыскин В.Г., Орозобаков А.Т. Об особенностях распределения озона в стратосфере по результатам одновременных наземных микроволновых измерений в Нижнем Новгороде и Кыргызстане //Метеорология и гидрология, Москва, 2012, №10, с.24-32.
5. <http://mirador.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/mirador/presentNavigation.pl?tree=project&project=MLS>.
6. Орозобаков А.Т., Рыскин В.Г. Микроволновые наземные измерения суточных вариаций озона в верхней стратосфере над Киргизией //Известия РАН Физика атмосферы и океана, Москва, 2015, №1, том 51, с.88-95.
7. Орозобаков А.Т., Саякбаева Б.Б., Орозобаков Э.У. Наземные радиофизические наблюдения высотного распределения озона над регионом Средней Азии //Журнал радиоэлектроники, Москва, 2018, №12, с.1-13.