

УДК 551.510.53

Токтомышев Советбек Жайлообекевич,
директор центра мониторинга атмосферы КНУ им. Ж.Баласагына,
академик НАН КР
Toktomyshev Sovetbek Zhailoobekovich,
director of the atmosphere monitoring center, Kyrgyz National University
academician NAS of the KR

Аманалиев Марс Кыдыргычевич,
руководитель Озонового центра КР
Amanaliyev Mars Kydyrgaevich,
head of the Ozone center of the Kyrgyz Republic

Орозалиев Мусапар Джумалиевич,
директор Института инновационных профессий КГУСТА,
канд. физ.-мат. наук, доцент
Orozaliyev Musapar Dzhumaliyevich,
director of the Institute of innovative professions of the Kyrgyz State University of Construction,
Transport and Architecture

Жумабеков Аман Айтбаевич,
инженер научной станции «Иссык-Куль» КНУ
Zhumabekov Aman Aitbaevich,
engineer of the scientific station «Issyk-Kul» KNU

ВОССТАНАВЛИВАЕТСЯ ЛИ ОЗОНовый СЛОЙ АТМОСФЕРЫ НАД ГОРНЫМ РЕГИОНОМ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ?

Аннотация. Приводятся результаты многолетних исследований истощения и восстановления (1980-2020 гг.) озонового слоя над горным регионом Центральной Азии (ст. «Иссык-Куль»).

Ключевые слова: атмосфера, озоновый слой, парниковые газы, изменение климата.

БОРБОР АЗИЯНЫН ТООЛУУ АЙМАГЫНЫН УСТУНДӨ АТМОСФЕРАНЫН ОЗОН КАТМАРЫ КАЛЫБЫНА КЕЛТИРИЛГЕНБИ?

Аннотация. Борбордук Азиянын тоолуу аймагындагы озон катмарынын бузулушу жана калыбына келүүсүнө (1980-2020-жж.) узак жылдар бою жүргүзгөн изилдөөлөрүнүн жыйынтыгы келтирилген (ст. «Иссык-Куль»).

Негизги сөздөр: атмосфера, озон катмары, парник газдары, климаттын өзгөрүшү.

IS THE OZONE LAYER OF THE ATMOSPHERE RESTORED OVER THE MOUNTAINOUS REGION OF CENTRAL ASIA?

Abstract. The results of long-term studies of the depletion and recovery (1980-2020) of the ozone layer over the mountainous region of Central Asia (“Issyk-Kul” research station) are presented.

Key words: atmosphere, ozone layer, greenhouse gases, climate change.

Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК), а также авторы [1-3] дают оценку и прогноз относительно того, когда озоновый слой вернется к величинам 1980 года. Предполагается, что его восстановление произойдет в середине XXI века на средних широтах и в Арктике, а несколько позже в Антарктике. Авторы [4,18], также прогнозировали, что озоновый слой над горным регионом Центральной Азии к своему

исходному состоянию до 1980 года вернется к 2025-2030 годам, считая его следствием изменчивости климатообразующих параметров атмосферы. В данной статье обсуждаются особенности истощения и восстановления озонового слоя (1980-2020 гг.) над горным регионом Центральной Азии (ст. «Иссык-Куль») в сопоставлении с данными полученными на других станциях, расположенных на океанических и равнинных территориях.

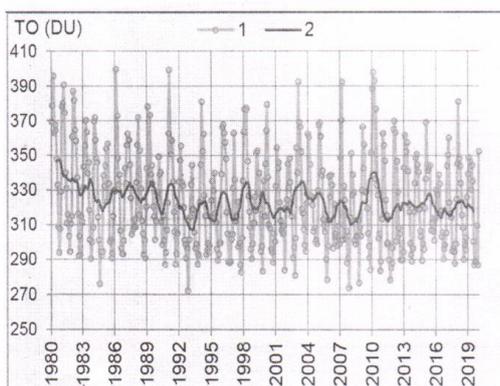


Рис.1. Временные вариации среднемесячных (1) и межгодовых значений ОСО (2) к данным, измеренным на станции Иссык-Куль

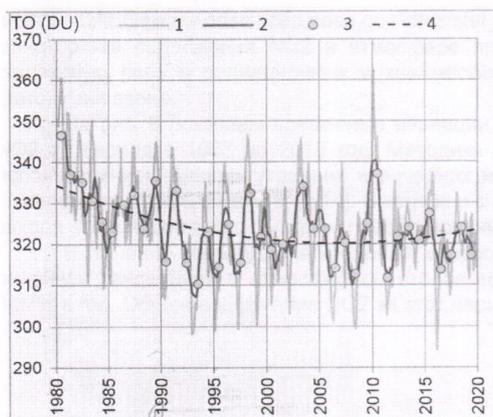


Рис.2. Вариации межгодовых (2) и среднегодовых (3) значений ОСО (DU) с параболическим трендом (4)

На рис. 1 и 2 представлены вариации среднемесячных (кривая 1) и межгодовых (2) и среднегодовых (3) значений ОСО с параболическим трендом (4) по данным измерений на ст. «Иссык-Куль».

Измерения общего содержания озона (ОСО) проводилось с помощью спектрофотохимического сканирующего устройства (СФСУ), разработанного Кыргызским государственным университетом.

ОСО в атмосферном столбе определялось многоволновым методом по результатам измерений поглощения солнечного излучения атмосферой на шести длинах волн: 303,3; 305,2; 308,6; 311,0; 313,8 и 315 н.м. Отклонения результатов измерений с помощью СФСУ от мировой озонометрической шкалы (Добсона №108 и Брюэра №44) не превышает 2%. [6]

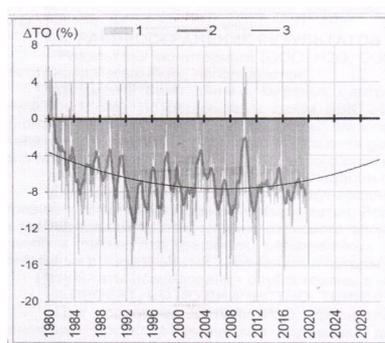


Рис.3. Отклонение значения ОСО в % (1) относительно значений ОСО в 1980 году и плавного (2) и параболического тренда (3)

Результаты наземных измерений среднедневных величин ОСО, измеренные в 1996-2005 гг. прибором TOMS установленном на спутнике Нимбус-7. Они согласуются между собой с коэффициентом корреляции (К) равным 0,95. Величина К в отдельные годы изменялся от 0,92 до 0,98. [6,7]

На рис. 3 показаны отклонения среднемесячных значений ОСО (1), выраженные в % относительно среднегодового цикла ОСО за 1980 г. Полиномиальная тенденция второго порядка (кривая 3) демонстрирует истощение озонового слоя до 2008 года и его восстановление в последующие годы. Видно, что истощение озонового слоя за период 1980-2008 гг. составило в среднем 8%. Согласно оценке тенденций, восстановление озонового слоя над горным регионом Центральной Азии до уровня 1980 года ожидается примерно 2029-2032 годах. Однако, в разные периоды наблюдений истощение и восстановление озонового слоя над горным регионом происходили с разными темпами.

Так, в естественной изменчивости ОСО над горным регионом Центральной Азии был зарегистрирован значительный провал, связанный с загрязнением стратосферы вулканическим аэрозолем в связи с извержением вулканов Эль-Чичон (апрель 1982 г.) и Пинатубо (июнь 1991 г.). Восстановление озонового слоя после вымывания аэрозоля продолжалось в течение 4-х лет. В 1980-1983 гг. и 1991-1993 гг. падение ОСО были наибольшими и отрицательный тренд составил, соответственно $-(2,1 \pm 0,1)$ - $-(4,5 \pm 0,1)$ % за год. С 1994 г. по 1998 г. наблюдался рост ОСО. При среднем значении ОСО 320 е.Д. тренд составил $(0,64 \pm 0,19)$ % в год. Для периода с 1993 по 1999 год наблюдалась тенденция увеличения концентрации озона, которая была отмечена и на других озонометрических станциях наблюдения (ВМО, 1999). [6,7]

Истощение озонового слоя над горным регионом Центральной Азии происходило со скоростью на 33% быстрее, чем над центральным регионом Казахстанской степи ($46,8^0$ с.ш., $61,7^0$ в.д., 56 м. н.ур.м.) и 8,5 раз

быстрее, чем над центральным регионом Тихого океана ($19,5^{\circ}$ с.ш., 155° з.д.). Кроме того, истощение озонового слоя (с 1980 по 2000 гг.) оказалась равной $0,39\%$ за год, что на 9% больше скорости уменьшения озона для средних широт Северного полушария, которая по данным (ВМО, 1999 г.) за этот же период составила $0,30\%$ за год. [6]

На фоне истощения озонового слоя над горным регионом в отдельные периоды были зарегистрированы отрицательные отклонения ОСО, превышающие трехкратный уровень естественных вариаций (3σ) озона, который для средних широт Северного полушария для изменчивости ОСО $3\sigma = \pm 9\%$. Отрицательные отклонения ОСО превышающий этот уровень, мы классифицируем как локальные озоновые дыры.

Первая отрицательная аномалия, глубиной 11% была зарегистрирована в августе 1984 года. Далее локальные озоновые дыры наблюдались: в середине 1990, 1992 и 1994 гг., в весеннее время 1993, 1995 и 1997 гг. Максимальное истощение озона над горным регионом величиной $28,5\%$ было зарегистрировано 15 января 1999 г., а самая продолжительная (6 месяцев) – в январе-июне 1993 г.

Появление локальных озоновых дыр над горным регионом связано либо с обра-

зованием локальных озоновых дыр над Европой, либо причиной возникновения дефицита озона является затоки тропического воздуха и возникновение дополнительного механизма разрушения озона над Сибирью.

За период с 1983 по 1999 г. кроме отрицательных аномалий ОСО было обнаружено более 100 случаев аномальных отклонений среднемесячных значений от естественных вариаций спектральной прозрачности атмосферы (СПА), основных парниковых газов и УФ-В радиации достигающей поверхности Земли.

Отличительное явление наблюдалось с 6 по 24 мая 1999 года, когда одновременно происходило уменьшение озона, увеличение УФ радиации, уменьшение температуры стратосферы, увеличение концентраций H_2O и NO_2 и повышение температуры приземной атмосферы. Кроме того, появлению локальной озоновой дыры предшествовали сначала повышение температуры приземной атмосферы, концентрации H_2O , NO_2 , а затем понижение температуры стратосферы. [6]

На рис. 4 приведены вариации среднемесячных значений общего содержания двуокиси азота (ОС NO_2) в атмосфере над горным регионом за весь период измерений на ст. «Иссык-Куль»

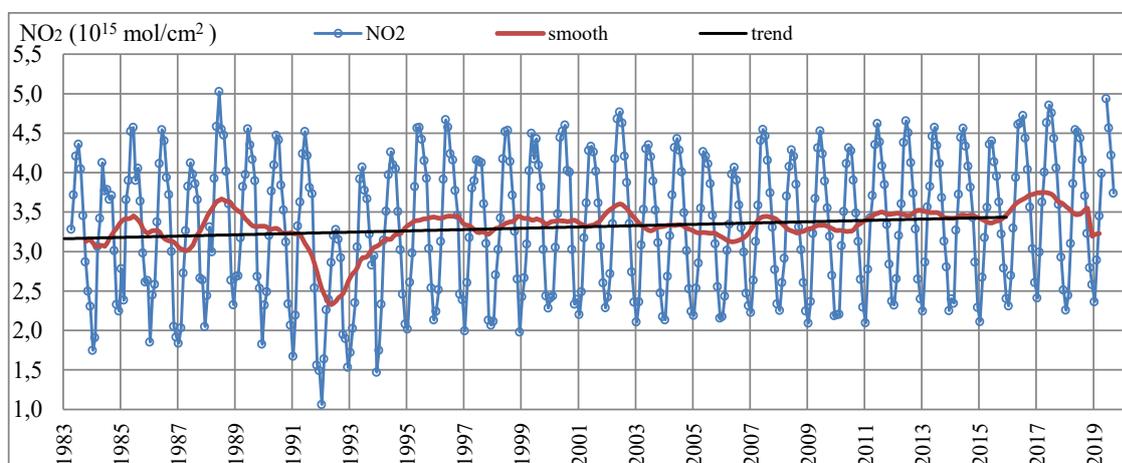


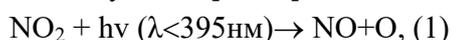
Рис.4. Среднемесячные значения NO_2 ее сглаженная (smooth) и тренд.

Спектроскопические измерения NO_2 на станции «Иссык-Куль» получили широкое распространение для валидации и проверки качества спутниковых измерений параметров атмосферы. [12,14]

Рис.4 демонстрирует глубокую и продолжительную отрицательную аномалию ОС NO_2 в 1991-1993 гг., связанный с извержением вулкана Пинатубо.

ОС NO_2 существенно изменяется в течение суток, особенно в период восхода и захода Солнца. Эти изменения связаны с быстрыми превращениями NO и NO_2 . Значение ОС NO_2 утром ниже, чем вечером, потому что число NO_2 увеличивается в течение дня.

С 1983 г. по 2015 г. концентрация NO_2 над горным регионом увеличилась на 8,37% со скоростью 0,28% в год. [4] Это увеличение концентрации NO_2 стало возможным при накоплении достаточного количества O_3 , O_2 и атомов O за счет фотохимических процессов, происходящих в атмосфере. Наиболее важными фотохимическими реакциями, в которых участвуют NO_2 и O_3 при солнечном свете и обычно наблюдаемые в атмосфере, являются следующие [14,15]:



Атомы кислорода O образуются при разрушении O_2 в стратосфере и NO_2 в тропосфере фотонами $h\nu$ солнечной радиации в ультрафиолетовом диапазоне.

Начальный этап превращения NO_2 в NO и O и последующее образование O_3 является одним из характерных фотохимических процессов в атмосфере. Поглощение солнечной ультрафиолетовой радиации в интервале длин волн от 200-300 нм, в результате которого происходит нагревание стратосферы, в основном связано с O_3 . Эти реакции представляются наиболее важными для установления взаимосвязи между концентрациями O_3 , NO , NO_2 и N_2O , когда они подвергаются воздействию солнечного ультрафиолетового излучения и приспособляются к большинству изменений, происходящих в атмосфере горного региона.

Спектральная прозрачность атмосферы (СПА) и аэрозольная оптическая толщина атмосферы (АОТ) оказывают существенное влияние на радиационные процессы в озоновом слое, которые с свою очередь обуславливают изменение ОСО в атмосфере. На рис.5 представлены среднемесячные значения СПА, измеренные на станции «Иссык-Куль» в 1982-1998 годах. [6] Погрешность определения средней месячной величины СПА составляет менее $\pm 2\%$. [6] На этом же рисунке 5 приведены линейный тренд и межгодичные изменения СПА. Данные наблюдений на станции «Иссык-Куль» показывают, что в среднем за весь период измерений СПА возросла на 5,4% со скоростью около 0,32% в год. Резкое уменьшение СПА в 1982-1984 и в 1991-1993 годах (сглаженная кривая, рис. 5) обусловлено извержением вулканов Эль-Чичон и Пинатубо. Это уменьшение вызвано аэрозольными частицами попавшими после извержения в стратосферу, разнесенными воздушными потоками по всему земному шару. Заметное уменьшение АОТ в атмосфере в этот период проявляется и в ее средних месячных величинах на 4,3%, при отрицательном тренде – 1,3% в год. Это уменьшение продолжалось с 1984 по 2009 гг., потом значение линейного тренда АОТ оставалось с 2009 г. по 2019 г. почти неизменной. (рис.7)

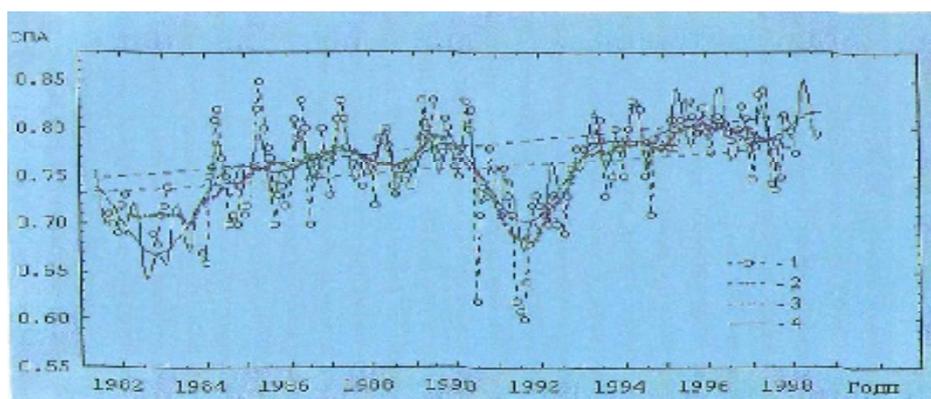


Рис.5. Результаты измерений спектральной прозрачности атмосферы.
1 – эксперимент, 2- скользящее среднее, 3- тренд, 4-расчет.

Опыт одновременных измерений содержания озона и интенсивности УФ радиации на многих станциях показал, что соотношение между изменчивостью озона и интенсивностью УФ радиации на поверхности Земли неоднозначно и сильно зависит от географических и атмосферных условий. Так, сопоставление вариаций озона с результатами измерений или вычислений потоков УФ радиации показали, что при уменьшении озона на 10% в экваториальной зоне ожидается увеличение УФ радиации на 18%, в средних широтах на 19% и на полюсах – на 22%. (ВМО, 1995) Поэтому для каждого региона необходимо проводить специальные исследования этого соотношения.

Из исследований авторов [6-8] следует, что:

- коэффициент корреляции между отклонениями ОСО и УФ-В радиации отрицательные и равен минус 0,58;
- экспериментально измеренные значения УФ-В радиации с 1990 по 2007 гг. увеличилось с 151,4 до 162,5 мВт/м² со скоростью линейного тренда $(0,39 \pm 0,05)\%$ за год;
- амплитуда внутригодовых колебаний УФ радиации 5-9 раз больше амплитуд сезонных изменений озона;
- существует устойчивая корреляция между изменчивостью ОСО и интенсивностью УФ радиации на длинах волн 305 нм и 312 нм;
- при сопоставлении среднемесячных

значений УФ-В радиации со средними многолетними значениями были зарегистрированы положительные аномальные отклонения УФ-В радиации величиной (15-20)% в 02.1993, 04.1995, 02.1999, 05.2000, 12.2000, 11.2001 и в январе и марте 2002 года. В отдельные дни весенне-летнего сезона положительные аномалии (всплески) достигали 40-65 % во время нахождения над горным регионом локальных озоновых дыр;

- преобладают сезонные (внутригодовые) колебания, связанные с изменениями в течение года высоты Солнца;
- интенсивность УФ радиации достигающей поверхности Земли для всех длин волн имеет отрицательную корреляцию с оптической плотностью аэрозоля;
- обнаружено, что в отдельные месяцы коэффициент усиления УФ радиации (радиационного коэффициента усиления - RAF) превышает значение равное 4,0. Это означает, что в эти периоды уменьшение озона на 1% сопровождалось возрастанием коротковолновой части УФ радиации на 4% и более. [6]

Отметим также, что глобальное уменьшение ОСО в стратосфере и рост его концентрации в тропосфере некоторых регионов Северного полушария могут привести к долговременным изменениям потоков излучения (с длиной волны: 280-315 нм и 8-13 мкм) и соответственно к изменениям глобального и регионального климата.

На рис.6 представлены в виде столбов вариации средних за год температур приземной атмосферы за период с 1975 по 1999 гг. [6] Пунктирной линией обозначено среднее за весь рассматриваемый период значение температуры, равное 8,24°C. Эту величину можно рассматривать как «климатическую норму» для нашего региона последней четверти XX века. Сплошной линией обозначен линейный тренд, положение которого свидетельствует о том, что в горных регионах за последнее время заметно потеплело. Самыми теплыми были 1990 и 1997 гг. Наиболее теплым оказался 1997 год, когда средняя годовая температура превысила норму на 1,25°C. Кроме того отметим, что за 1980-2000 гг. истощение озонового слоя со скоростью 0,39% в год, привело к уменьшению температуры стратосферы на высоте 22 км над горным регионом на 0,71% или на 1,5 градуса (Т°К), а увеличение парникового эффекта - к увеличению средней ежегодной температуры приземной атмосферы на 0,32% т.е. на 0,94 градуса.

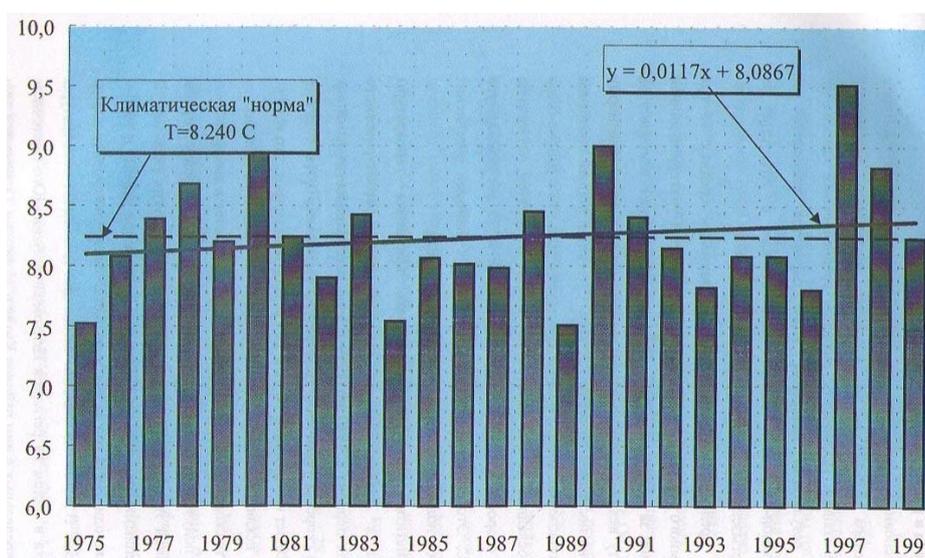


Рис.6. Вариации годовых температур приземной атмосферы (ст. «Иссык-Куль»)

Наблюдения за климатообразующими параметрами атмосферы (на ст. «Иссык-Куль») с 1990 по 2007 гг. показало, что ОСО с 316 е.Д. в 1990 г. уменьшился до 306 е.Д. в 2007 году, СПА увеличилась на 6,6%, что соответствовало среднемесячным измеренным значениям интенсивности УФ-В радиации достигающей поверхности Земли с 151,4 до 162,5 мВт/м². Кроме того, с 1981 по 2007 гг. рост концентрации CO₂ на 12% (или 40,5 ppm) и H₂O в толще атмосферы на 21% привели к повышению температуры приземной атмосферы на 7,8% или 0,6°C. [6-8].

С 2004 г. по 2016 г. многолетние, непрерывные измерения на станции «Иссык-Куль» показали, что долгоживущие парниковые газы CH₄ увеличились на 5,13% со скоростью 0,43% в год, а N₂O увеличилось на 3,54% со скоростью 0,29% в год. Зафиксирован аномально высокий рост содержания N₂O с конца 2015 г. За год содержание N₂O выросло на 13%, т.е. примерно в 5 раз выше средней скорости накопления за весь период наблюдений. [4]

Авторы [1,2] также отмечают, что CH_4 и N_2O достигли рекордной концентрации в 2014 году, демонстрируя стабильный рост в глобальном пространственном распределении в атмосфере каждый год с 2011 до 2014 г. Увеличение концентрации CH_4 повысит глобальный уровень озона, а N_2O - снижает его, поскольку N_2O является одним из источников окислов азота (NO , NO_2) в стратосфере. Кроме того, атмосферное разложение CH_4 является продуктом появления водорода (H), который участвует в образовании O_3 , H_2O и OH . Увеличение концентрации H_2O приводит к охлаждению температуры стратосферы, замедляя реакцию потери O_3 , т.к. более низкие температуры верхней стратосферы замедляют газофазные химические реакции, разрушающие озон. Радикалы OH участвуют в окислении SO_2 , как в газовой, так и в капельной фазах, присутствие таких частиц в атмосфере приводит к образованию аэрозольных частиц, которые влияют на аэрозольную оптическую толщину (АОТ) и спектральную прозрачность атмосферы (СПА). [6,7,13]

В изменчивости двуокиси серы (SO_2) преобладают сезонные изменения, минимум содержания SO_2 наблюдается в июле-августе, максимум – в феврале. За весь период наблюдений (2000-2016 гг.) содержание SO_2 в атмосфере увеличилось до аномалии на 90% со скоростью 5,99% в год.

Следует отметить, что в последние годы (2010-2016 гг.) по данным станции «Иссык-Куль», в атмосфере наблюдались относительно высокие значения SO_2 : например, в 2013 году среднегодовое значение SO_2 приблизительно в 1.7 раза (66%) превысило многолетнее среднее (2000-2011 г.г.) значение SO_2 в 2013 году – 1,7 раза (66,6%), в 2014 году - в 1.6 раза (58%), а в 2015 году – в 1.9 раза (85.5%). [4]

Был обнаружен рост H_2O и концентрация тропосферного озона в атмосфере горного региона. В среднем содержание паров воды за 20 лет (1981-2001 гг.) увеличилось примерно на 18%, а ежегодный рост был равен, в приближении линейного тренда - +0,9%. Концентрация тропосферного озона над горным регионом (измеренные УФ анализатором озона TEI49C) с 2003 г. по 2014 г. увеличилась на 1,85% со скоростью 0,15% в год. [6]

Кроме повышения концентраций выше отмеченных парниковых газов за последние годы (2004-2015 гг.) было зарегистрировано уменьшение концентрации CO над горным регионом. За весь период наблюдений CO уменьшилось на 24,5%, показатель отрицательного тренда составил -2,23% в год. Среднегодовое значение равно $(104,76 \pm 8,36)$ ppb. [4]

В среднем скорость накопления CO_2 в атмосфере над горным регионом в 1980-1999 гг. была равна $(2,05 \pm 0,1)$ ppmv/год. Это приблизительно на 37% больше чем средняя глобальная скорость роста CO_2 (ВМО, 1998). С конца 2013 г. наблюдался аномально высокие значения CO_2 в атмосфере. За весь период наблюдений (с 1980 по 2016 гг.) накопление CO_2 в атмосфере происходило со скоростью 0,49% в год или 1,7 ppmv/год. При этом абсолютная величина концентрации CO_2 возросла с 342 ppmv до 405 ppmv. Концентрация CO_2 за этот период увеличилась на 16,3%. Приведенные цифры увеличения CO_2 в атмосфере (ст. «Иссык-Куль») с большей достоверностью можно отнести ко всему горному региону Центральной Азии Евразийского континента. Так как характерный размер пространственной неоднородности в горизонтальном распределении для этой консервативной составляющей атмосферы достигает 1000 км. [6]

Кроме того, отметим, что [4,6]:

- неравномерность накопления CO_2 в атмосфере, зарегистрированная на станции «Иссык-Куль» с запаздыванием на 2 года повторяет неравномерность накопления CO_2 на станциях мониторинга Barrow, Mauna-Loa и South Pole. Причина такого запаздывания, по видимому, связана с континентальным расположением станции «Иссык-Куль»;
- скорость накопления CO_2 в атмосфере на горных регионах Центральной Азии была сравнена с данными на двух станциях глобальной сети: на станции Mauna-Loa (Тихий океан) и Schauinsland (Центральная Европа). Результаты показали, что неравномерность накопления CO_2 в атмосфере горного региона значительно превышает ежегодные изменения на Центральной части Тихого океана и Европы;
- сопоставление межгодовых изменений накопления CO_2 на станции «Иссык-Куль» с данными других станций Северного полушария (Monte Cimone, ITA; Niwot Ridge, USA; Mauna-Loa, USA) показало, что межгодовые изменения CO_2 на станции «Иссык-Куль» по абсолютной величине и по скорости накопления превосходят вариации CO_2 на океанических и прибрежных станциях.

Данные многолетних наблюдений (1980-2016 гг.) показывают высокую степень положительной корреляции CO_2 , H_2O , NO_2 с изменениями температуры приземной (ТПА) атмосферы ($K_{\text{CO}_2} = 0,6$; $K_{\text{H}_2\text{O}} = 0,52$; $K_{\text{NO}_2} = 0,15$) над горным регионом [5]. Сравнение межгодовых вариаций ОСО и ТПА (1980-2012 гг.) показало, что корреляция (K_{O_3}) между трендами устойчивая и отрицательная ($K_{\text{O}_3} = -0,4$), т.е. уменьшение концентрации озона соответствует увеличению приземной температуры атмосферы в условиях горной местности в региональном масштабе. Отметим также, что отрицательная корреляция обнаружена и в сравнении ОСО и CO_2 не только вековые, но и более быстрые изменения CO_2 и ОСО находятся в противофазе, истощение озонового слоя сопровождается накоплением CO_2 в атмосфере горного региона Центральной Азии.

Сопоставление вариаций среднемесячных и годовых значений общего содержания NO_2 в стратосфере и СПА в видимой области спектра показало, что внутригодовые изменения этих параметров находятся в противофазе, а межгодовые изменения в период с 1991 по 1996 гг. происходили синхронно. Эта особенность была связана с возмущением атмосферы, вызванном извержением вулкана Пинатубо.

Анализ изменений значения коэффициента корреляции ОСО и ТПА от года к году в сравнении с данными по аэрозольной оптической толщине АОТ и данными по солнечной активности NOAA (<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/solar/flux.html>) показал, что закономерность взаимосвязи ОСО и ТПА нарушается в годы повышенных значений содержания аэрозоли в атмосфере, а также в периоды смены магнитной полярности Солнца и его вспышечной активности. При исключении таких периодов из обработки данных, наблюдается улучшение тесноты взаимосвязи ОСО и ТПА, т.е. значение коэффициента корреляции повышается. Так при исключении периодов (1981-1983, 1989-1990, 1999-2000, 2013-2014 годы) из обработки данных значение коэффициента корреляции достигает $K_{\text{O}_3} = -0,67$.

Сравнительный анализ межгодовых вариаций ОСО и УФ-В радиаций показывает их высокую корреляцию (их темпов изменений с 2003 по 2016 гг.) с обратным знаком, т.е. увеличение ОСО сопровождается уменьшением УФ-В радиации и наоборот, уменьшение концентрации ОСО вызывает усиление интенсивности УФ-В радиации, причем если минимальные отклонения ОСО достигали минус 20%, то максимальное увеличение УФ-В – 40%. Линейные тренды ОСО и УФ-В радиации отрицательные, причем увеличение интенсивности доз УФ-В радиации было примерно в 2 раза быстрее. [5,7]

Анализ коэффициента корреляции H_2O и ТПВ и по сравнению с данными по АОТ и данными солнечной активности NOAA показывает, что закономерность взаимосвязи H_2O и ТПВ нарушается в годы повышенных значений содержания аэрозоли в атмосфере, а также в периоды смены магнитной полярности Солнца и его вспышечной активности. При исключении таких периодов из обработки данных, значение коэффициента корреляции повышается до $K_{H_2O}=0,74$.

На межгодовые вариации NO_2 значительное влияние оказывает содержание аэрозолей в атмосфере. Повышение аэрозольной оптической толщины АОТ сопровождается спадом концентрации NO_2 в атмосфере. Значение коэффициента корреляции между АОТ и NO_2 оказалось достаточно высоким $K=-0,75$.

Установление факта существования прямых связей между этими климатическими параметрами для атмосферы горного региона имеют немаловажное значение. Возможно, это прольет свет в понимании между поведением озонового слоя и изменениями климата.

Приведенные выше особенности состояния озонового слоя над горным регионом Центральной Азии свидетельствуют о том, что в указанный период с 1980 по 2020 гг. в отличие от равнинных и океанических регионов, в изменчивости атмосферных параметров, определяющих изменения климата, вариации озона, а, следовательно и в изменчивости УФ-В радиации достигающей поверхности Земли, наблюдаются существенные аномальные отклонения, которые увеличивают вероятность возникновения атмосферных процессов, приводящих к восстановлению озонового слоя.

Мы полагаем, что в горных регионах может действовать значительная изменчивость ультрафиолетового излучения, аномальные отклонения содержания парниковых газов (от естественных изменений) через атмосферно-земную цепь (когда ОРВ, контролируемый Монреальским протоколом, в стратосфере больше не увеличивается) ускоряют фотохимические и динамические процессы, которые способствуют восстановлению O_3 в атмосфере горного региона намного раньше, чем над равнинами и океанами. Об этом наглядно свидетельствуют наблюдаемые положительные тенденции в медленных изменениях прозрачности (рис. 7) и температуры поверхности атмосферы (рис.6), H_2O , NO_2 (рис.2), АОТ (рис. 5), рекордное увеличение (с 2013 г.) в концентрациях парниковых газов CO_2 , N_2O , CH_4 , SO_2 и тесной корреляции ОСО с температурой поверхности и УФ-В излучением атмосферы [4,5]. Отметим также, что парниковый эффект вследствие увеличения содержания CO_2 в горных районах происходит на 40% быстрее, чем над центральным регионом Тихого океана [6].

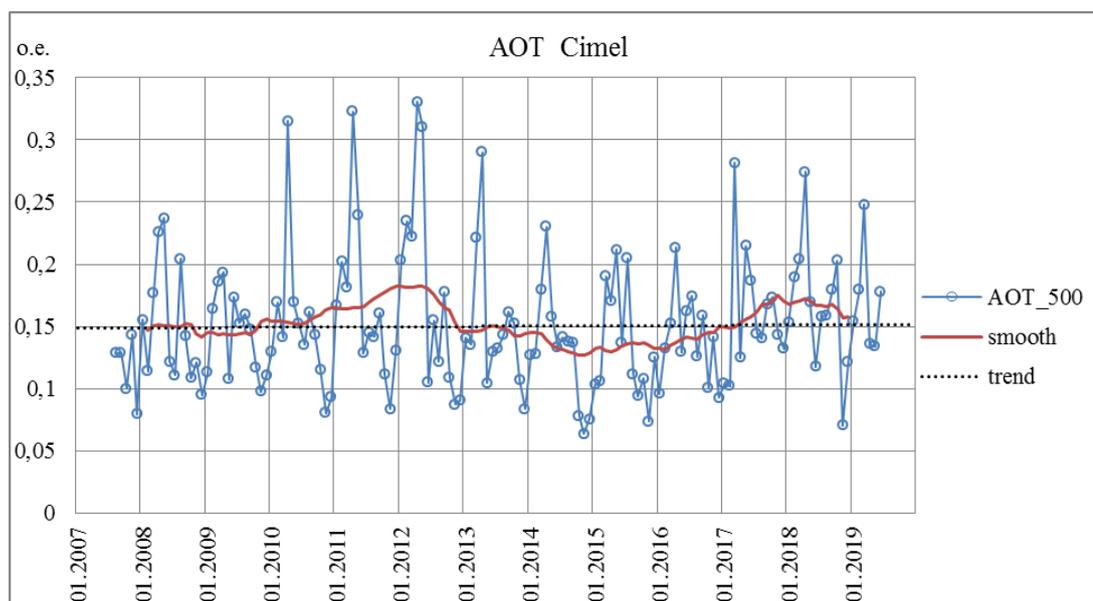


Рис.7. Среднемесячные (AOT) и межгодовые (smooth) значения AOT и линейный тренд. Измерения AOT производились автоматическим радиометром Cimel модели CE 318-V855-M9.

Согласно МГЭИК и моделированию климата причины и последствия изменений озонового слоя и климата неразрывно связаны:

- увеличение или уменьшение воздействия стратосферного или тропосферного озона на климат и, следовательно, представляет собой прямую связь между озоном и климатом;
- выделение озона и получаемого в результате ультрафиолетового излучения в различных регионах планеты зависит от содержания парниковых газов в атмосфере;
- изменения в ТО будут варьироваться в зависимости от фотохимии и, в зависимости от географических регионов, связаны с ультрафиолетовым излучением В и движением воздуха;
- увеличение тропосферного озона и других парниковых газов приводит к потеплению климата;
- повышение температуры тропосферы (из-за увеличения парникового эффекта) в сочетании с более низкой температурой в некоторых областях нижней стратосферы будет способствовать восстановлению озона. Восстановление будет происходить по мере уменьшения ОРВ и изменения климата.

В горных регионах эти процессы контролируются климатическими факторами. Поэтому изменение климата может существенно повлиять на восстановление озонового слоя атмосферы. Растущее содержание парниковых газов в сочетании с прозрачностью атмосферы и изменчивостью УФ радиации приведут к изменению температуры, фотохимии и циркуляции в тропо-стратосфере, которые в свою очередь спровоцируют атмосферные процессы, приводящие к увеличению O_3 и восстановлению ОСО в атмосфере. Возможны и другие варианты развития событий, но неизменным в этом процессе остается одно – изменение климата в горных регионах.

Наиболее значимый сигнал современного глобального потепления климата, как отмечается в работе [13], может быть обнаружен в центральных районах Азиатского материка как наиболее обширного и удаленного на значительное расстояние от океана, который сглаживает колебание температуры. Горные регионы Тянь-Шаня удалены от Атлантического океана примерно на 6500 км, от Тихого океана – 3830 км, от Северного Ледовитого океана – 3380 км и отличается сильной расчлененностью и приподнятостью (средняя высота ее территории – 3000 м, а наибольшая 7439 м). Климат характеризуется континентальностью, аридностью и продолжительностью солнечного сияния.

Именно в горных регионах с высокой степенью изменчивости климата, прозрачности атмосферы и хорошей доступностью УФ-В радиации следует ожидать ускорение восстановительных процессов озона в атмосфере раньше, чем на океанических и равнинных территориях. Горы являются живой полевой лабораторией для раннего обнаружения признаков различных климатических изменений в атмосфере, в том числе, и изменений в озоновом слое. Этому способствуют кроме фотохимических и динамические (локальные) процессы вертикального перемещения воздуха в атмосфере, особенно на высотах от 8 до 20 км.

При восходящих потоках содержания озона в столбе атмосферы уменьшается, при нисходящих – возрастает. Из-за возникновения воздушных потоков восстановления озона над горами будет больше, чем над равнинной. Этот механизм воздействия на озон имеет особое значение там, где часто наблюдаются интенсивные вертикальные переносы воздуха за счет орографического возмущения (реализуемые в горных регионах Центральной Азии [16]) набегających на горные препятствия горизонтальных движений в тропосфере. [14]

Восстановление озонового слоя носит региональный характер и, прежде всего, проявляются во внутриконтинентальных областях горных регионов из-за отсутствия мощных промышленных предприятий и заметных антропогенных источников загрязнителей атмосферы.

Важную роль в этом явлении играют процессы снижения концентрации ОРВ, изменения климата, прозрачности атмосферы и усиления интенсивности УФ радиации в горных экосистемах с большими высотными градиентами, где переносы воздушных масс за счет орографического возмущения приводят к возникновению и интенсификации восстановительных процессов O_3 в атмосфере.

В заключении отметим, что Монреальский протокол вступил в силу 1 янв. **1989** года и достиг всемирной ратификации в **2009** году. В частности Кыргызстан к 1 января **2020** года завершил в полном объеме работу в рамках Монреальского протокола по выводу из использования основных видов озоноразрушающих веществ.

Литература

1. Браатен Г. Восстанавливается ли озоновый слой? //Бюллетень ВМО. 2015г.Т.64. №1.с. 52-55.
2. Блэр Тревин. Основные положения Первого заявления о состоянии глобального климата за пятилетний период. Бюллетень ВМО, 2016г., Т.65 (1) с.24-27.
3. *Michaela I. Hegglin (Lead Author), David W.Fahey, Mack McFarland, Stephen A.Montzka, and Eric R. Nash, Twenty Questions and Answers About the Ozone Layer: 2014 Update, Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014, 84 pp., World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 2015.*
4. Токтомышев С.Ж., Орозалиев М.Д. Озоновый слой атмосферы в центральной части Евразийского континента. – Бишкек, Доклады НАН КР, 2018, №1, с.31-43.
5. Токтомышев С.Ж., Орозалиев М.Д. О корреляции концентрации парниковых газов с приземной температурой атмосферы. – Бишкек, Доклады НАН КР, 2019г. №1, с.34-41.
6. Токтомышев С.Ж., Семенов В.К. Озоновые дыры и климат горного региона Центральной Азии. – Стамбул, Suzat Gorsel Sanatlar Merkezi, 2001г.-211с.
7. Токтомышев С.Ж., Семенов В.К., Аманалиев М.К., Орозалиев М.Д., Синяков В.П. Региональный мониторинг атмосферного озона. – Бишкек, LL"Color", 2009 г.-164с.
8. *Semenov V.K., Sinyakov V.P., Toktomyshev S.J., Sorokina L.J., Ignatova N.J. Results of experimental Studies of the Parametr of the Earth's Atmosphere in of the Issyk-Kul GAW Station. Bishkek 2007.-P. 56.*
9. *Semenov, V.K., A. Smirnov, V.N. Aref'ev, V.P. Sinyakov, L.I. Sorokina, and N.I. Ignatova (2005), Aerosol optical depth over the mountainous region in central Asia (Issyk-Kul Lake, Kyrgyzstan), Geophys. Res. Lett., 32, L05807, doi:10.1029/ 2004GL021746,2005.*
10. *Ionov D.V., Semyonov V.K., Sinyakov V.P. et al. Validation of satellite total ozone and NO2 data by ERS-2 GOME, ENVISAT SCIAMACHY and AURA OMI with ground-based UV-Visible measurements over Russia and NIS, //European Geosciences Union, General Assembly 2006, Vienna, Austria, 02-07 April 2006,*
11. *Toktomyshev S.J., Amanaliev M. The 30-th anniversary of Vienna Convention for the Protection of the Ozone layer Kyrgyzstan. [http://ozone.unep.org/en/30 -the - anniversary-vienna-convention-and-international-ozone-day](http://ozone.unep.org/en/30-the-anniversary-vienna-convention-and-international-ozone-day) 2015.*
12. *Orozaliev M.D., Toktomyshev S.J. The variability of the ozone layer and greenhouse gases in the atmosphere above the central mountainous part of the Euroasian continent. [http://ozone.unep.org/en/30 -th - anniversary-vienna-convention-and-international-ozone-day](http://ozone.unep.org/en/30-th-anniversary-vienna-convention-and-international-ozone-day) 2017.*
13. *Houghton J.T. et all, Climate Change 1995, The Science of Climatic Change./ the Camb. Univ.Press, Cambridge, England,1996.*
14. Александров Э.Л., Израэль Ю.А., Кароль И.Л., Хргиан А.Х. Озонный щит Земли и его изменения. С.Пб.: Гидрометеоиздат, 1992. - 288 с.
15. *М.Мак-Ивен, Л.Филлипс. Химия атмосферы. Из-во Мир, -Москва 1998, - 373 с.*
16. *Айдаралиев А.А., Токтомышев С.Ж. и др. Горы Кыргызстана. – Бишкек, Изд. «Технология» 2001, - 319с.*