

## КЛИМАТИЧЕСКИЙ ОТКЛИК ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИЗЕМНОГО ВОЗДУХА НА ИЗМЕНЧИВОСТЬ ОЗОНОВОГО СЛОЯ НАД ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТЬЮ ЕВРАЗИЙСКОГО КОНТИНЕНТА

*Бул иште “Ыссык-Көл” илимий станциясында, климатты түзүүчү атмосферадагы курамдардын 33-жылдык мониторингинин жана озондун жалпы курамынын (ОЖК), ультрафиолет нурдануусунун интенсивдүүлүгүн (УФ), аэрозолдун оптикалык калыңдыгынын (АОК) убакыт вариациялары жана тренддери боюнча изилдөөлөрүнүн натыйжалары келтирилген. Тоолуу аймак үчүн атмосферадагы климат түзүүчү курамдарынын узак убакыттагы вариацияларынын өзгөчөлүктөрү, жана алардын атмосферадагы кээ бир геофизикалык процесстери, күндүн активдүүлүгүн (КА) өзгөрүшү менен корреляциялык байланыштары такталды. Озон курамынын өзгөрүлүшүнө карата жерге жакын аба температурасынын (ЖЖАТ) климаттык отклигинде регионалдык өзгөчөлүктөрү (ички континенталдуу тоолуу эффект) аныкталды. Евразия континентинин орто бөлүгүнүн үстүндө күтүлгөн ОЖК эксперименттик маалыматтарды жана прогноздук баалоолорун өзгөрмөлөрүнүн жеткиликтүү деңгээлде так ачыктаган статистикалык моделдери иштетип чыкты.*

*В данной работе приводятся результаты исследования временных вариаций и трендов общего содержания озона (ОСО), интенсивности приземной ультрафиолетовой радиации (УФ), аэрозольной оптической толщи (АОТ), полученных в течение 33-летнего мониторинга климатообразующих составляющих атмосферы на научной станции Иссык-Куль (ИК). Установлены особенности долговременных вариаций климатообразующих составляющих атмосферы для горного региона, их корреляционные связи с некоторыми геофизическими процессами в атмосфере и с изменениями солнечной активности. Определены региональные особенности (внутриконтинентальный горный эффект) климатического отклика ТПВ на изменения содержания озона. Разработаны статистические модели, позволяющие с достаточной степенью точности описывать имеющиеся экспериментальные данные и делать прогнозные оценки ожидаемых изменений ОСО в атмосфере над центральной частью Евразийского континента.*

*This paper presents the results of a study of temporal variations and trends of total ozone content (TOC), the intensity of surface ultraviolet radiation (UV), the aerosol optical depth (AOD) obtained during 33-year monitoring of climate forcing constituents of the atmosphere at Issyk-Kul (IK) research station. The features of long-term variations in climate forcing constituents of the atmosphere for the mountain region, and their correlations with some geophysical processes in the atmosphere and changes in solar activity were defined. Regional features (inland mountain effect) of climate response of SAT to ozone content changes were defined. Statistical models were developed to reliably describe the available experimental data and make predictions of expected changes in TOC in the atmosphere over the central part of the Eurasian continent.*

### Введение

Современный климат представляет собой результат воздействия как естественных, так и антропогенных факторов. Закономерности изменений глобального климата весьма сложны, поэтому для оценки возможных последствий изменений климата и их влияния на окружающую среду и экономику представляют интерес исследования климатических изменений по отдельным регионам. При этом одной из важных и нерешенных проблем

современной физики атмосферы является решение задачи о взаимосвязи между изменениями состояния озонового слоя и термодинамическими параметрами тропосферы.

В данной работе приводятся результаты исследования временных вариаций и трендов общего содержания озона (ОСО), интенсивности приземной ультрафиолетовой радиации (УФ), аэрозольной оптической толщи (АОТ), полученных в течение 33-летнего мониторинга климатообразующих составляющих атмосферы на научной станции Иссык-Куль (ИК). На базе этих данных разработаны статистические модели, позволяющие с достаточной степенью точности ( $r=0,94$ ) описывать имеющиеся экспериментальные данные и делать прогнозные оценки ожидаемых изменений состояния озонового слоя над центральной частью Евразийского континента. Определены региональные особенности (*внутриконтинентальный горный эффект*) отклика ТПВ на изменения содержания озона в атмосфере по данным наблюдений на ст. Иссык-Куль. Установлены особенности долговременных вариаций климатообразующих составляющих атмосферы для горного региона, их корреляционные связи с некоторыми геофизическими процессами в атмосфере и с изменениями солнечной активности.

Детальные описания методов и методик измерений, комплекса измерительной аппаратуры, используемого на научной станции Иссык-Куль, и подробный библиографический список по данному вопросу приведены в работах [1, 2].

### Региональные особенности климатического отклика температуры приземного воздуха на изменения общего содержания озона

Оценка региональных особенностей климатического отклика на изменения общего содержания озона (ОСО) проводилась по данным многолетних наблюдений метеостанций за температурой приземного воздуха в различных регионах территории Кыргызстана. При этом учитывался тот факт, что данные станции Иссык-Куль по ОСО в стратосфере распространяются на мезомасштабные области[2].

На рисунке 1 представлены отклонения среднемесячных значений ОСО (1), выраженных в % относительно от средне-сезонного хода, соответствующего 1980 году. Утолщенная сплошная кривая линия (2) представляет собой усредненные 13-месячным сглаживанием межгодовые вариации отклонений ОСО, тонкая сплошная кривая линия – полиномиальный тренд 2-го порядка (3), прогнозная экстраполяция которого позволяет оценить возможное восстановление ОСО к 2025-2030 гг.

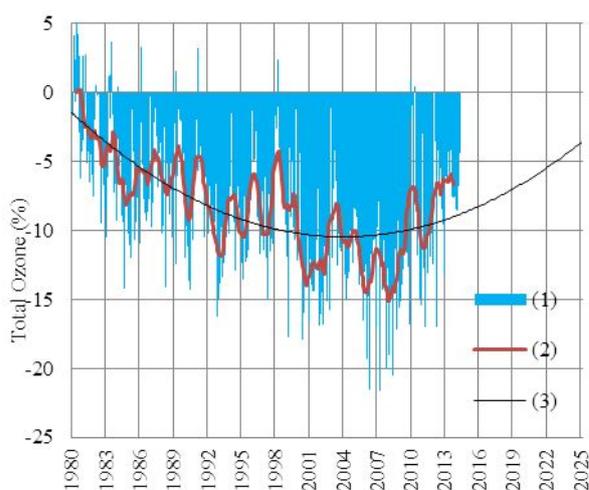


Рис. 1. Эволюция ОСО (с 1980 г по 2025 г).

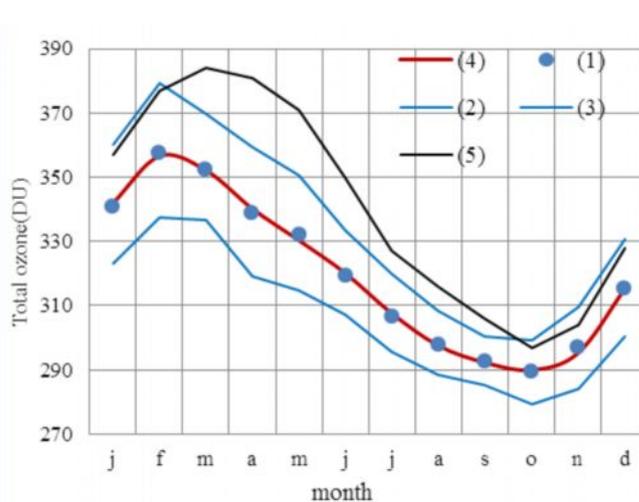


Рис.2. Среднесезонный ход (норма) ОСО (1), полученный за период с 1980-2013гг., в сравнении с нормой (5) из [3].

Из Рис. 1. видно, что заметное истощение озонового слоя происходило с начала периода наблюдения до 2004 года, а с 2005 года началось его восстановление. Однако на фоне полиномиального тренда в межгодовых вариациях ОСО наблюдаются более короткие интервалы с трендами интенсивного истощения озонового слоя: 1 - с 1980 по 1985 годы, 2 – с 1989 по 1993 годы, 3 - с 1998 по 2008 годы, а в промежутках между этими интервалами (1985-1989гг., 1993-1998гг., 2008-2013гг.) наблюдаются положительные тренды (восстановления). Причина таких изменений ОСО, как будет показано далее, обусловлена колебаниями солнечной активности и некоторыми геофизическими процессами в атмосфере Земли (Рис.11.). В межгодовых колебаниях отклонений ОСО (рис.1) четко прослеживаются квазидвухлетние колебания, а также нарушения длительности их периодов в 1991-1993, 1999-2001 и в 2013-2014 годах. Эти годы соответствуют эпохам максимумов в 11-летней цикличности солнечной активности, а также периодам повышенной вулканической и сейсмической активности Земли.

33-летний период наблюдения позволил нам определить средне-сезонный ход ОСО – климатическую норму(за 1980-2013 гг.) для Центрально-Азиатского региона, который представлен на рисунке 2 (кривая 1) с границами среднеквадратичных отклонений (кривые 2, 3 рис. 2). В отличие от нормы (кривая 5 на Рис. 2.), взятой из работы Хргиана А.Х.[3], которая определялась для средних широт за период 1957-1988 гг., в нашей норме ОСО наблюдается сравнительно быстрый рост ОСО в течение 4-х месяцев, с октября по февраль (макс. ОСО - 357,5 е.Д.), а затем, вплоть до октября, происходит медленное снижение в течение 8 месяцев (мин. ОСО- 289,5е.Д.). Отличие наблюдается не только в характере изменения ОСО от месяца к месяцу, но и в его абсолютных значениях.

На основе спектрального Фурье-анализа временного ряда среднемесячных значений ОСО за период с 1980 по 2013 год получено уравнение:

$$X(t)= \sum A_i \cos(2\pi/T_i)t + B_i \sin(2\pi/T_i)t + X_{\text{ср.}}, \quad (1)$$

с периодами  $T$  и значениями коэффициентов  $A$  и  $B$  (см. табл.1):

Таблица 1

$i$	$T$	$A$	$B$
1	12,0	15,60	27,57
2	6,0	4,96	5,44
3	4,0	1,56	2,46

Уравнение (1) описывает средне-сезонный ход в изменении ОСО с коэффициентом корреляции  $r = 0,999$  (кривая 4, рис.2), где  $X_{\text{ср.}} = 320,6$  е.Д. - среднее значение ОСО за 33- летний период наблюдения.

В качестве характеристики, отображающей изменчивость регионального климата, нами используются 33-летние данные по температуре приземного воздуха (ТПВ). На рисунке 3 сравниваются среднемесячные и межгодовые отклонения ТПВ и ОСО от их норм, полученных на станции Иссык-Куль. Отклонения среднемесячных значений ТПВ и ОСО от многолетних средних (норм) характеризуют многолетнюю изменчивость ОСО и ТПВ. Представленные данные демонстрируют значимую тесноту связи между ОСО и ТПВ. Получено, что среднее за период 1980-2013 годы значение коэффициента корреляции  $r = -0,36$  - для среднемесячных отклонений и  $r = -0,38$  - для межгодовых вариаций ОСО и ТПВ. Полученные значения коэффициента корреляции можно считать значимыми и достаточно высокими, т.к. коэффициент корреляции  $r$  превышает свою среднюю ошибку  $\sigma_r$  более чем в 8 раз, даже притом, что корреляция проводилась для всего 33-летнего ряда ОСО и ТПВ без выборки. Проверка тесноты связи ОСО и ТПВ дополнительно проводилась методом определения коэффициентов корреляции рангов Спирмэна, которая также показала высокое значение  $r = -0,36$ .

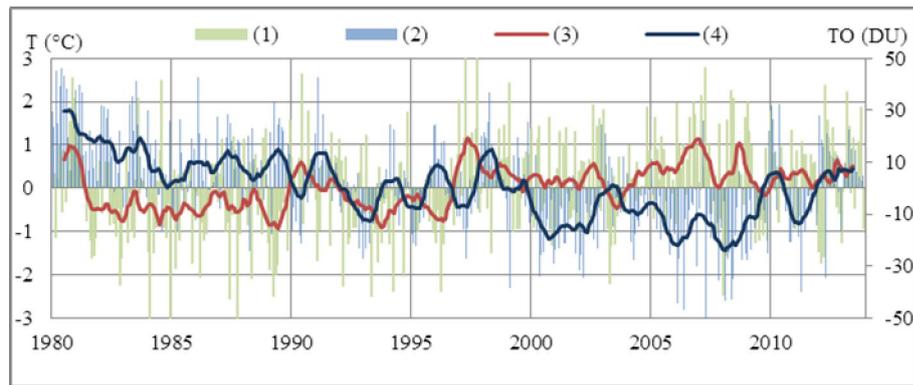


Рис.3. Сравнение среднемесячных (1), (2) и межгодовых (3), (4) отклонений ТПВ и ОСО от их норм соответственно для района озера Иссык-Куль.

Отрицательное значение  $\Delta T$  для ОСО и ТПВ показывает, что спад содержания стратосферного озона сопровождается повышением температуры приземного воздуха, а его увеличение – понижением ТПВ. Одной из причин такой зависимости является косвенное и прямое влияние дополнительной ультрафиолетовой нагрузки при снижении ОСО на физические, фото- и биохимические процессы, протекающие в тропосфере и на подстилающей поверхности и отвечающие за энергетический баланс в системе Земля-атмосфера-Солнце, в частности, за повышение содержания парниковых газов в тропосфере, за тропо-стратосферный и меридиональный обмен воздушными массами и др. Полученная нами обратная зависимость уровня ультрафиолетовой В-радиации (УФ-В), достигающей поверхности Земли, от «толщины» озонового слоя для горных условий более существенна, чем для равнинных и океанических (Рис.4.). В последние годы наблюдается высокий рост амплитуд межгодовых колебаний ОСО и УФ-В. Так, значительное падение ОСО с 2010 по 2012 годы сопровождается существенным ростом интенсивности УФ-В радиаций, а с конца 2012 по 2013 г включительно - наблюдается обратный процесс.

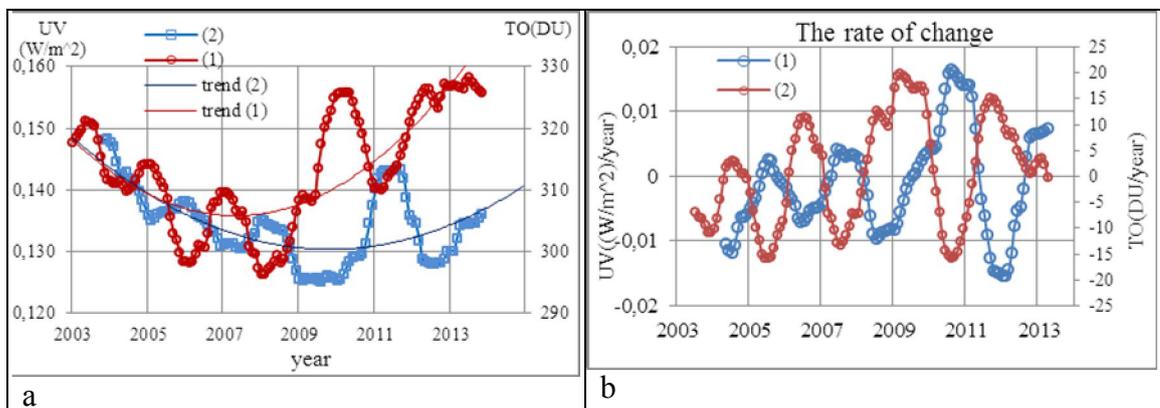


Рис. 4. Сравнение:а) межгодовых вариаций ОСО (1) и УФ-В (2);б) межгодовых вариаций темпов изменений УФ-В(1) и ОСО (2)

Анализ изменения значения коэффициента корреляции ОСО и ТПВ из года в год по сравнению с нашими 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 ТПВ нарушается в годы повышенных значений содержания аэрозоля 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 ТПВ, т.е. значение коэффициента корреляции повышается. Так, при исключении периодов(1981-1984, 1991-

1993, 1999-2001, 2011-2013 годы) из обработки данных значение коэффициента корреляции достигает до  $r = -0,67$ .

Значения коэффициента корреляции также повышается при сдвиге всего временного ряда ТПВ относительно ОСО на 3–4 месяца в сторону начала периода наблюдений. Это означает, что изменения ТПВ следуют за изменениями ОСО.

### Локальная чувствительность ТПВ к изменениям ОСО

Локальная чувствительность ТПВ к изменениям ОСО в атмосфере для различных регионов территории Кыргызстана продемонстрирована на рисунке 5, где: 1- межгодовые вариации ОСО; 2,3,4,5,6 – межгодовые вариации ТПВ по данным станций Тянь-Шань, Жалал-Абад, Бишкек, Нарын, Иссык-Куль соответственно. Следует отметить, что обработка данных ОСО и ТПВ проводилась нами по одинаковой методике.

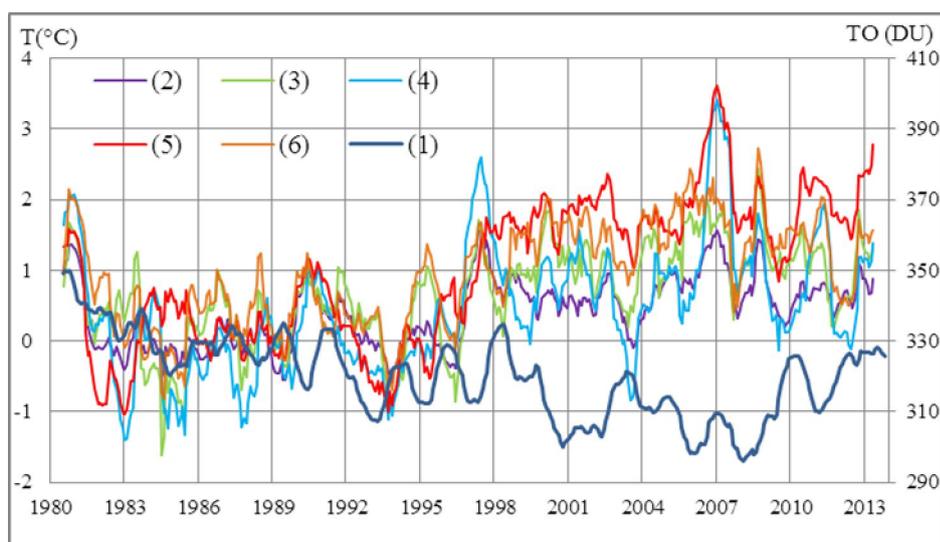


Рис. 5. Сравнение межгодовых вариаций (1)-ОСО (ТО) и ТПВ (Т): (2)Чолпон-Ата (ИК),(3)- Бишкек, (4)- Нарын, (5)-Тянь-Шань, (6)- Джалал-Абад.

Значения коэффициентов корреляций  $r$  до и после исключения из временных рядов вышеупомянутых периодов (1981-1984, 1991-1993, 1998-2001, 2010-2013 годы) для ОСО и ТПВ, соответствующих разным регионам приведены в таблице 2.

Таблица 2

№	$r$		название станции(высота над уровнем моря)	№	$r$		название станции(высота над уровнем моря)
	до исключения	после исключения			до исключения	после исключения	
1	-0,38	-0,69	Чолпон-Ата (1650m.a.s.l)	5	-0,49	-0,69	Байтик (1580 m.a.s.l.)
2	-0,57	-0,74	Тянь-Шань (3635 m.a.s.l.)	6	-0,44	-0,65	Талас (1218 m.a.s.l.)
3	-0,49	-0,78	Джалал-Абад (764 m.a.s.l.)	7	-0,32	-0,58	Нарын (2040 m.a.s.l.)
4	-0,43	-0,77	Бишкек (760 m.a.s.l.)	8	-0,58	-0,83	Алматы (851m.a.s.l.)

Установлено, что локальная чувствительность ( $\Delta$ ТПВ/ $\Delta$ ОСО) ТПВ на изменение ОСО низкая в акватории озера Иссык-Куль и высокая в районе высокогорных метеостанций Нарын, Тянь-Шань (Рис.5.). Причем исследования с добавлением в

обработку данных по ТПВ и других метеостанций (Алматы, Талас, Байтик и др.) показали, что амплитуда отклика ТПВ на изменение ОСО зависит от высоты пункта наблюдения ТПВ над уровнем моря, от покрова подстилающей поверхности региона, за исключением акватории озера Иссык-Куль. Такую специфическую особенность климатического отклика на изменение состояния озонового слоя можно обозначить как *внутриконтинентальный горный эффект*.

### Антропогенный фактор в повышении ТПВ

При одинаковой методике обработки данных метеостанций Чолпон-Ата, Тянь-Шань, Джалал-Абад, Бишкек, Нарын, нами установлено, что средние скорости роста температуры приземного воздуха (ТПВ) за период 1980-2013гг. (Рис.6.a,b) для регионов Бишкека, Нарына, Джалал-Абада почти одинаковы (рис.6b), несмотря на различие географических условий (месторасположения по высоте над уровнем моря, по удаленности друг от друга и по покрову подстилающей поверхности суши), а также на различие антропогенных источников загрязнений.

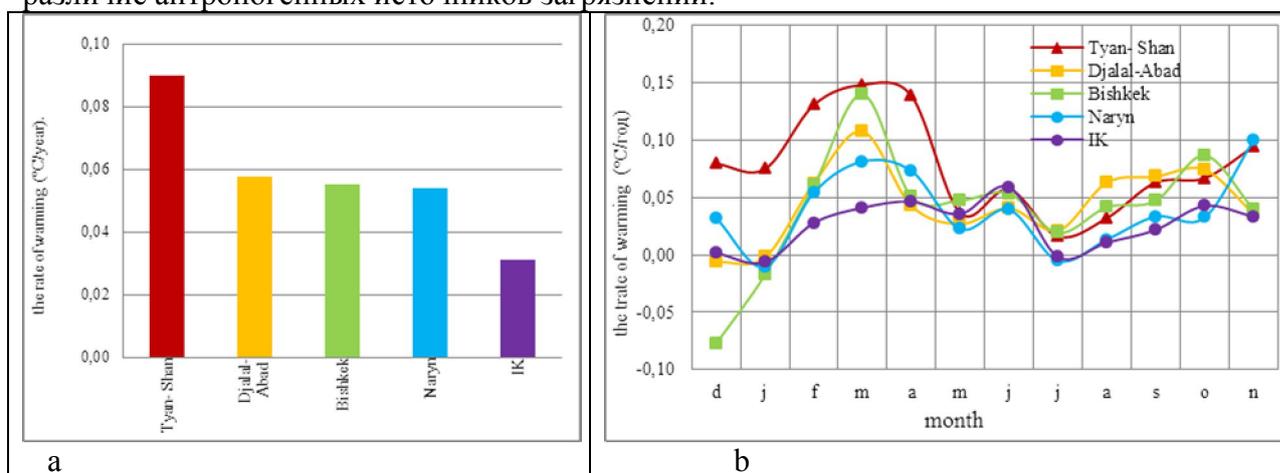


Рис. 6. Сравнение средних скоростей роста ТПВ в районе станций Тянь-Шань, Джалал-Абад, Бишкек и Иссык-Куль, полученных: а) по общим линейным трендам ТПВ за период с 1980-2013 гг.; б) по линейным трендам за каждый месяц года с 1980 по 2013г.

Обнаружено, что потепление в районе ст. Тянь-Шань протекает высокими темпами, причем отличительный от других регионов резкий рост ТПВ наблюдается с 1996 года, который совпадает с началом интенсивной работы (Рис.4.) высокогорного (3635м надуровнем моря) золоторудного комбината «Кумтор», расположенного в нескольких км от метеостанции Тянь-Шань. Эволюция ТПВ в окрестности «Кумтор» по сезонам года за наблюдаемый период хорошо демонстрируется на Рис. 7. Средняя за период с 1980-2013 год скорость потепления в 1,6 раза выше, чем в регионах Бишкека, Нарына, Джалал-Абада и почти в 3 раза выше, чем в районе станции Иссык-Куль, несмотря на их близость друг к другу (Рис.6.a.). Такая высокая скорость потепления отражается и на темпах таяния ледников в регионе.

Установлено, что в районе станции Тянь-Шань (Рис. 6b.) за период 1980-2013гг. высокие темпы роста ТПВ по сравнению с другими регионами происходили в широком временном интервале года (ноябрь - апрель), тогда как на других станциях потепление происходило с меньшей скоростью и в узком временном интервале года. Вышеприведенные экспериментальные факты дают основание полагать, что основными причинами таких темпов роста ТПВ являются: 1. ухудшение отражательной способности (альбедо) подстилающей поверхности этого региона как из-за сокращения ареала снежно-ледового покрова, так и из-за загрязнения его поверхности аэрозольными частицами, выбрасываемыми при разработке (взрывах, транспортировке, др.) грунта и при непосредственной работе комбината; 2. усиление парникового эффекта, обусловленного повышением содержания климато-активных газовых и аэрозольных

примесей-загрязнителей атмосферы, участвующих в фотохимических реакциях, а также активизация этих процессов отраженными солнечными лучами от поверхности снежно-ледового покрова, площадь которого увеличивается с наступлением зимы и уменьшается с наступлением лета. Из сравниваемых данных наименьшая средняя скорость роста ТПВ приходится на район станции Иссык-Куль (Чолпон-Ата) (Рис. 6.а). Это, очевидно, связано с нахождением в этом районе энергоемкого водного резервуара - озера Иссык-Куль, который «сглаживает» амплитуды годовых и межгодовых колебаний ТПВ (Рис.5., Рис.6. а,b), т.е. в акватории озера Иссык-Куль отклик ТПВ более инертен к изменениям содержания климато-активных составляющих атмосферы. Это подтверждается также относительно малым значением коэффициента корреляции ОСО и ТПВ по сравнению с другими регионами (см. табл.2).

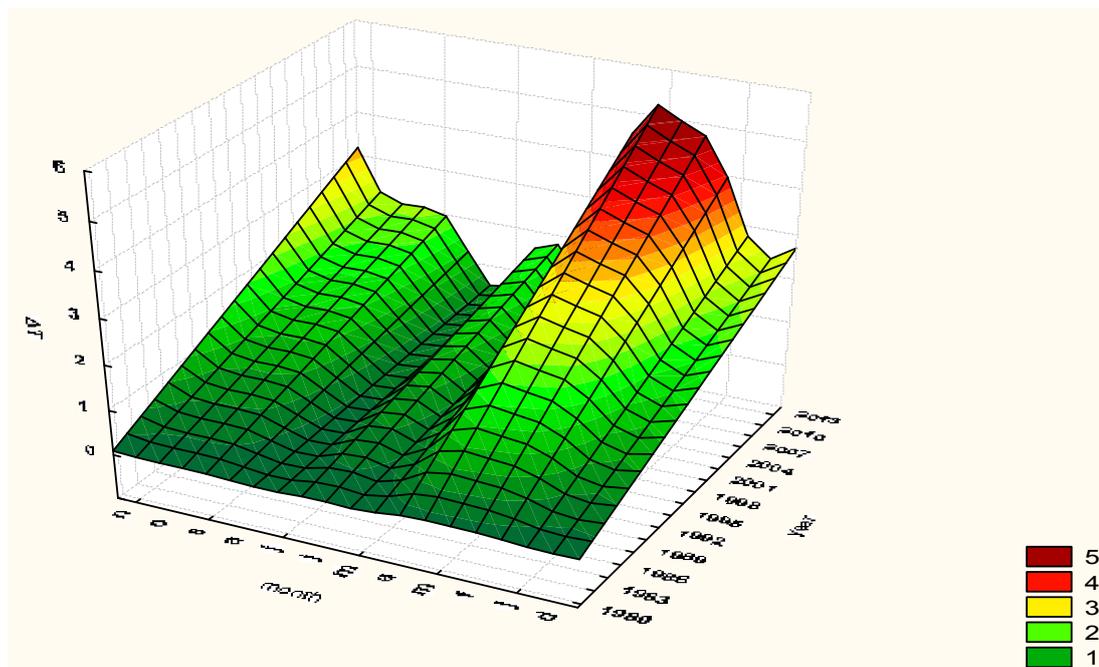


Рис. 7. Эволюция ТПВ в окрестности «Кумтор» по сезонам года за 1980-2013 гг.

### Аэрозольная оптическая толщина (АОТ), Солнечная активность и эволюция ОСО

На Рис.8.а представлен среднесезонный ход АОТ с границами среднеквадратичных отклонений, определенный из экспериментальных данных за период с 1984 по 2013г. Здесь же приведена норма (кривая 4), рассчитанная по формуле (2) при значениях периодов  $T$  и коэффициентов  $A, B$ , представленных в таблице 6, и при  $X_{cp} = 1,25$ . Значение коэффициента корреляции между экспериментальными и расчетными данными составляет  $r = 0,975$ . В отличие от других радиационно-активных газовых компонент атмосферы в среднесезонном ходе АОТ наблюдаются два максимума, которые приходятся на месяцы апрель и сентябрь, а минимумы – на месяцы июнь и декабрь.

На рисунке 8b представлены полученные после обработки среднемесячные и межгодовые вариации АОТ за период с 1984 по 2013 год. Разрывы данных в 2011 году связаны с калибровкой измерительного прибора СИМЕЛ в Центре космических полетов им. Годдарда, NASA (NASA Goddard Space Flight Center). Аномально высокие содержания аэрозолей соответствуют периодам вулканической и сейсмической активности Земли, которые совпадают с эпохами максимумов в 11-летней цикличности Солнечной активности.

Таблица 3

$i$	$T$	$A$	$B$
1	12,0	-0,0120	0,0173
2	6,0	-0,0089	0,0217
3	4,0	0,0015	-0,0076
4	2,4	-0,0026	0,0068

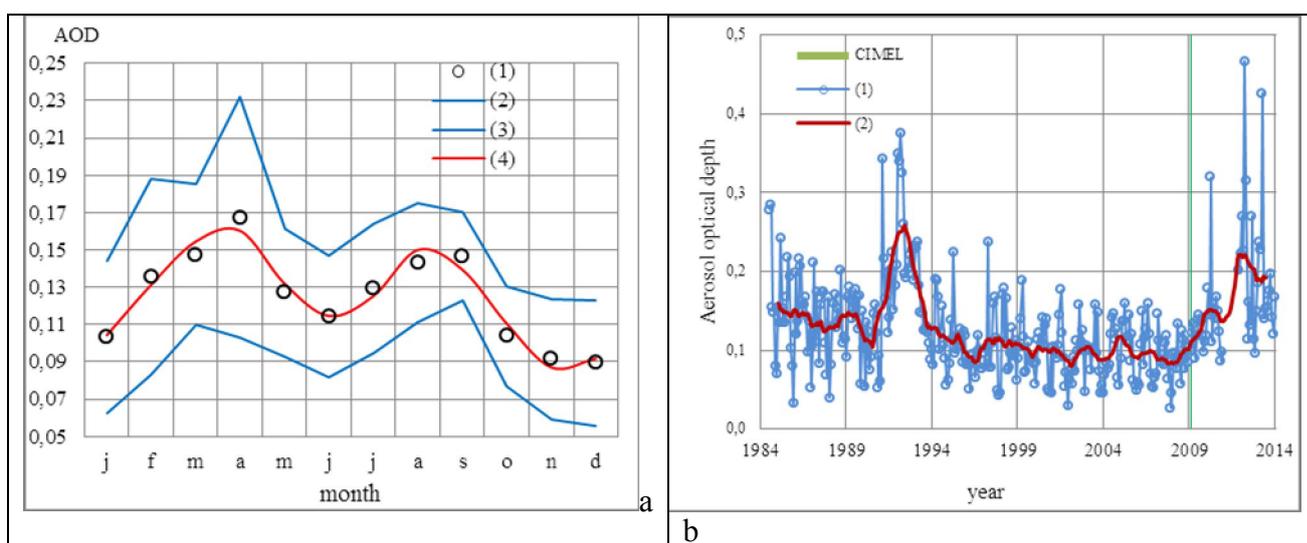


Рис.8. а) Средне-сезонный ход AOD (1) с границами среднеквадратичных отклонений (2)(3), полученный за период с 1984-2013гг., в сравнении с рассчитанной (кривая 4); б) Среднемесячные (1) и межгодовые (2) вариации AOT (AOD).

Сравнение межгодовых вариаций AOT и ТПВ (Рис. 9.) показывает значимую тесноту связи в изменениях AOT и ТПВ, причем эта связь обратная, повышение AOT сопровождается спадом ТПВ, а спад AOT – увеличением ТПВ. Значение коэффициента корреляции  $r = -0,37$  для периода с 1985 по 2010 год (до разрыва данных). Следует отметить, что это значение  $r$  повышается при сдвиге временного ряда ТПВ только в сторону начала наблюдений, так при сдвиге ряда ТПВ до 6 месяцев значение  $r$  растет до  $r = -0,5$ . Это означает, что изменение ТПВ следует за изменением AOT.

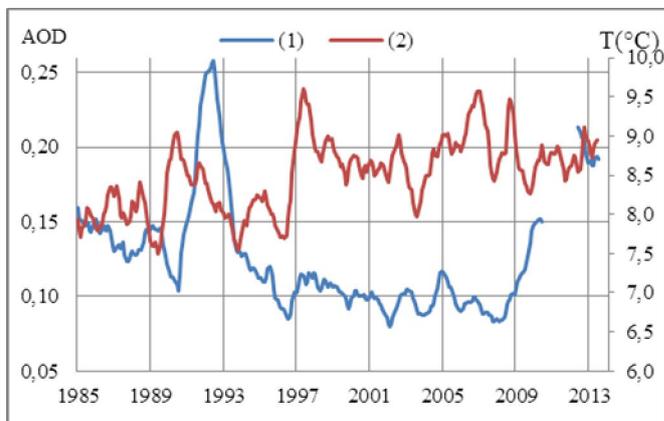


Рис.9. Сравнение межгодовых AOT (1) и ТПВ (2)

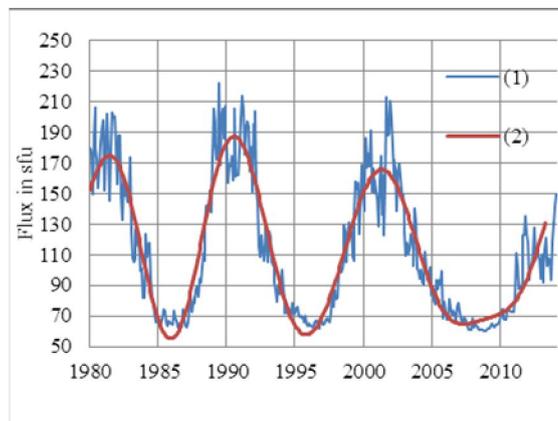


Рис. 10. Вариации солнечной активности (F10,7)

На Рис. 10. представлены изменения солнечной активности (СА) – интенсивности радиоизлучения Солнца на волне 10,7 см (кривая 1), построенная по среднемесячным данным [6], а также данные модельного расчета (кривая 2), проведенного нами с целью изучения составляющих гармоник СА за период с 1980 по 2013 гг, а также их влияния на изменчивость измеряемых климато-активных компонент атмосферы на станции Иссык-Куль.

На основе сопоставительного анализа экспериментальных данных с использованием методов математической статистики выявлены особенности влияния солнечной активности на долговременные вариации, тренды и скорости изменения исследуемых радиационно-активных составляющих атмосферы ( $O_3$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $NO_2$ , АОТ и др.).

Показано, что внутриконтинентальной горной части Евразии отклик исследуемых параметров атмосферы на изменение солнечной активности проявляется более значимо, чем в океанических и равнинных регионах земного шара.

Таким образом, результаты исследования показывают, что климат горного региона очень чувствителен к изменениям общего содержания озона, аэрозолей и загрязнителей в атмосфере, вызванным как естественными, так и антропогенными факторами.

На базе 33-летнего банка экспериментальных данных станции ИК разработаны уточненные статистические модели (Рис. 11.), позволяющие с достаточной степенью точности ( $r=0,94$ ) описывать имеющиеся экспериментальные данные (кривая 1) и делать прогнозные оценки (кривые 2,3) ожидаемых изменений общего содержания озона в атмосфере над центральной частью Евразийского континента. Это, в свою очередь, позволяет сделать качественный прогноз изменчивости регионального климата на ближайшее десятилетие.

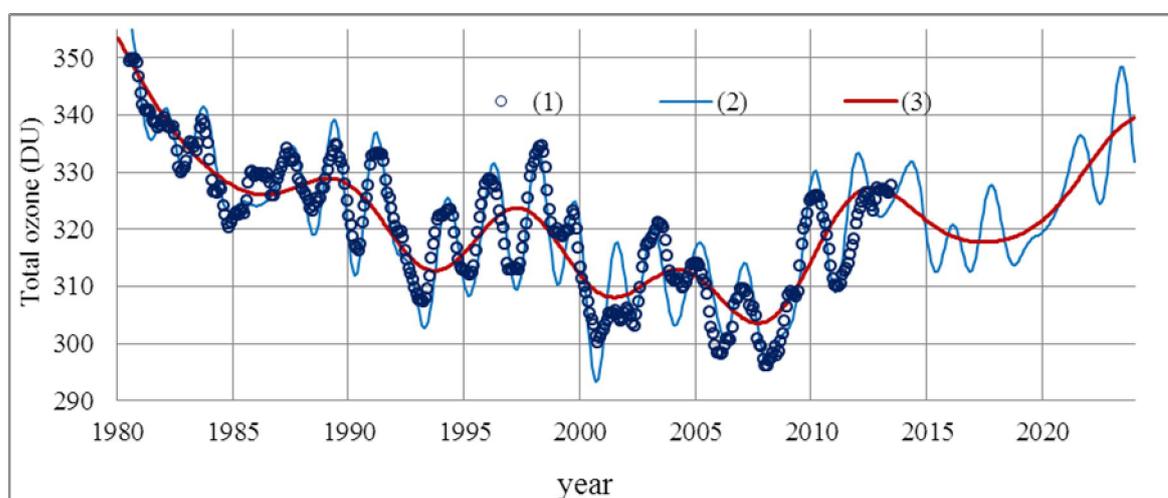


Рис.11. Эволюция ОСО: (1)- экспериментальные данные, (2)- модельный расчет межгодовых вариаций ОСО,(3)- модельный расчет без учета высокочастотных колебаний в изменениях ОСО

### Список литературы

1. Региональный мониторинг атмосферного озона [Текст] / С.Ж.Токтомышев, В.К. Семенов, М.К.Аманалиев и др. - Бишкек: “LL Color”, 2009. - 164 с.
2. Токтомышев С.Ж.Озоновые дыры над Центральной Азией [Текст] / С.Ж. Токтомышев, М. Дж. Орозалиев. – Бишкек: 2011. - 316с.

3.Хргиан А.Х. О процессах длительных и кратковременных изменений озона в некоторых областях северного полушария [Текст] / А.Х. Хргиан // Метеорология и гидрология. – 1992. - №7. - с.5-16.

4.<http://www.thermograph.ru>

5.<http://www.sidc.be>

6.<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/solar/flux.html>