

УДК 551.510.534:911.2

А.В. Холопцев, Т.С. Юсупова

СВЯЗИ ИЗМЕНЕНИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДНЕМЕСЯЧНЫХ ОСО НАД АНТАРКТИКОЙ, А ТАКЖЕ ГЛОБАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ МИРОВОГО ОКЕАНА, ПРИ СОВРЕМЕННОМ ПОТЕПЛЕНИИ КЛИМАТА

Севастопольский национальный технический университет

Статистические связи межгодовых изменений глобальных поверхностных температур Мирового океана, а также запаздывающих по отношению к ним на 7 месяцев в сентябре и октябре, а также на 12 месяцев в мае среднемесячных значений общего содержания озона над Антарктикой, за период современного потепления климата существенно усилились. При дальнейшем потеплении климата вероятно их еще большее усиление, что свидетельствует о целесообразности их учета при моделировании и прогнозировании.

Ключевые слова: общее содержание озона, Антарктика, глобальные поверхностные температуры Мирового океана, современное потепление климата, корреляция.

Введение. Изменчивость потока ультрафиолетовая радиация, воздействующего на биоценозы многих регионов суши, во многом обусловлена изменениями распределения в атмосфере над ними озона. Поэтому выявление роли в изменениях этого распределения различных природных факторов является актуальной проблемой физической географии, метеорологии и экологии.

Наибольший интерес решение данной проблемы представляет для регионов, над которыми амплитуда сезонных изменений среднемесячных значений общего содержания озона (ОСО) [1], достигает максимальных уровней. К их числу относится Антарктика, где в летне-осенний период значения ОСО превосходят средние уровни, наблюдаемые в земной атмосфере, а в весенние месяцы – ежегодно образуется озоновая дыра.

Систематические наблюдения за состоянием озоносферы над Антарктикой начались в 50-х годах XX века, после открытия во многих районах Антарктиды стационарных полярных станций. Существенный вклад в развитие представлений о происходящих в ней процессах внесли исследования, проведенные по программе Международного геофизического года (1957-1959 гг.). Именно тогда, с использованием прямых инструментальных методов, озоновая дыра над Антарктидой была впервые выявлена [2].

Так, измерения Добсона 1957 г. на станции Halley-Bay (Великобритания) с координатами (75°S, 26°W), показали, что антарктической весной наблюдалось аномальное уменьшение ОСО, которое впоследствии восстанавливалось.

По измерениям ОСО на станции Дюмон-Дюрвиль ($66,7^{\circ}\text{S}$, 140°E) было установлено, что 18.10.1957 г. ОСО составило 120 единиц Добсона.

Уменьшение ОСО в сентябре–ноябре, начиная с 1974 г., наблюдали также советские ученые на антарктических станциях Мирный ($66,6^{\circ}\text{S}$, 93°E), Новолазаревская ($70,8^{\circ}\text{S}$, $11,8^{\circ}\text{E}$) и Восток ($78,5^{\circ}\text{S}$, $106,9^{\circ}\text{E}$) [3]. Пространственную конфигурацию озоновой аномалии над Антарктидой впервые удалось выявить в ходе международного самолетного эксперимента 1978 г., показавшего, что область, в которой происходит уменьшение ОСО, является единой.

Наличие убывающих трендов межгодовых изменений значений ОСО в весенние месяцы было установлено на антарктических станциях: Halley-Bay (75°S , 26°W) за период (1957-1968 г.г.), Syowa (69°S , 40°E) – с 1965 по 1976 г. и South Pole (90°S) – с 1962 по 1972 г. При этом оказалось, что за 11 лет на первой станции значения ОСО уменьшились на 6,3%, на второй – 6,6%, а на третьей станции за 10 лет – на 5,4% [4].

Новый этап изучения особенностей пространственно-временной изменчивости ОСО над Антарктикой связан с вводом в эксплуатацию в январе 1979 г. глобальной системы спутникового мониторинга упомянутой характеристики, которая сделала возможным позволившей получение оперативной информации о ее значениях для любых, в том числе наиболее труднодоступными, районами планеты. Благодаря ее функционированию ныне упомянутая информация представлена в свободном доступе на Интернет-сайте Всемирного центра мониторинга ультрафиолетовой радиации и озона [5], что позволяет изучать особенности изменчивости распределения ОСО над Антарктикой, в любые месяцы, с разрешающей способностью 1×1 град. и с точностью около 5 ед.Д. (единиц Добсона).

Спутниковый мониторинг распределения ОСО во всей земной атмосфере осуществляется с помощью прибора TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) – спектрофотометра, установленного на ИСЗ Nimbus-7 (1978-1993 г.г.), Метеор-3 (1991-1994 г.г.), Earth Probe (1996-2004 г.г.) и прибора OMI, функционирующего на ИСЗ Aura (с 2005 г. по настоящее время). Спектральная область измерений составляет 160–400 нм. Погрешность дистанционных измерений ОСО составляет не более 2%.

Установлено, что озоновая дыра над Антарктидой возникает ежегодно в сентябре-ноябре и существует до наступления полярного дня.

Согласно современным представлениям, озоновая дыра – это устойчивое понижение в весенние месяцы ОСО в атмосфере над большей частью территории Антарктиды ниже уровня 220 е.Д.

За период современного потепления климата выявлено устойчивое уменьшение значений ОСО в Дыре от 209 е.Д (в 1979 г.) до 106 е.Д (в 2007 г.). Площадь области озоновой дыры в Антарктическом сегменте атмосферы за тот же период возросла от 1 млн. км² (1979 г.) до 30,6 млн. км² (2000 г.).

Анализ результатов мониторинга пространственно-временной изменчивости ОСО над Антарктикой показал, что характеристики образующейся здесь озоновой дыры варьируют по времени наблюдения в соответствии с изменениями параметров циркуляции воздуха в Антарктическом сегменте стратосферы. Причиной этих изменений является проявляющаяся в нем в весенние месяцы неоднородность поля атмосферного давления, характерными особенностями которой являются барический максимум над приполярными районами и барическая депрессия над Антарктической зоной конвергенции, расположенной вблизи параллели 65°S. Атмосферное давление в последней определяется температурой и влажностью воздуха, поднимающегося здесь от поверхности соответствующих акваторий Мирового океана. Поэтому его изменения обусловлены изменчивостью распределения их поверхностных температур.

Как известно [1, 6], к числу важнейших факторов пространственно-временной изменчивости ОСО в тех или иных сегментах атмосферы относятся изменения потоков поступающих в них веществ, принимающих участие в разрушении стратосферного озона. Основная часть этих потоков поступает в стратосферу с поверхности акваторий Мирового океана. Особенности их образования, а также переноса в тропосфере во многом определяются характеристиками распределения его поверхностных температур и прежде всего их средним значением, рассматриваемым как глобальная поверхностная температура. Значению аномалии указанной характеристики соответствует глобальный климатический индекс GMSST[7].

Поскольку большая часть поверхности Мирового океана расположена в Южном полушарии, которое, в современный период, к тому же за год получает солнечной радиации на 7% больше чем Северное, временная изменчивость GMSST в основном обусловлена изменениями поверхностных температур акваторий, граничащих с Антарктикой, либо относящихся к ней. К их числу относятся и акватории, расположенные в Антарктической зоне конвергенции (вблизи параллели 65°S), в атмосфере над которыми происходит подъем в стратосферу воздуха, содержащего вещества, участвующие в разрушении стратосферного озона. Последнее позволяет предполагать, что изменения GMSST способны относиться к числу факторов временной изменчивости распределения ОСО в атмосфере над Антарктикой.

За период современного потепления климата (с 1979 по 2010 гг.) среднегодовые и среднемесячные значения GMSST ощутимо возросли [7, 8], что

позволяет выдвинуть гипотезу, согласно которой при этом произошло усиление статистических связей между их изменениями, а также изменчивостью распределения ОСО в земной атмосфере, в том числе и в ее Арктическом сегменте.

Необходимым условием адекватности прогноза изучаемого процесса, является учет, в математической модели, используемой для его разработки, связей с факторами, которые в соответствующий период будущего будут значимыми. Последнее представляется вероятным, если на доступном изучению отрезке его предыстории эти связи устойчиво усиливались и ныне являются значимыми.

Выявление связей, обладающих указанным свойством, для процессов, рассматриваемых в данной работе, позволило бы повысить эффективность их прогнозов. Поэтому проверка адекватности выдвинутой гипотезы представляет значительный теоретический и практический интерес.

Систематический мониторинг изменчивости GMSST осуществляется уже более столетия, а его результаты за период, начиная с января 1948 г. представлены на Интернет сайте [8]. Тем не менее, изменения статистических связей между рассматриваемыми процессами, произошедшие за период современного потепления климата ныне изучены недостаточно.

Учитывая это, в качестве объекта исследования, выбраны изменения распределения среднемесячных значений ОСО над Арктикой, происходящие в различные месяцы, а также индекса GMSST.

Предмет исследования – изменения характеристик связей между рассматриваемыми процессами, которые произошли за период современного потепления климата.

Цель работы – выявление условий, при которых статистические связи между изменениями GMSST, а также распределения ОСО над Антарктикой за период современного потепления климата устойчиво усиливались и ныне являются значимыми.

Методика исследований и фактический материал. Для достижения данной цели, для каждого месяца выявлены значения временных сдвигов между изменениями ОСО над Антарктикой, а также изменениями индекса GMSST, при которых статистические связи между ними, за период современного потепления климата устойчиво усиливались и на отрезке времени с 1989 по 2010 г. являются значимыми, с достоверностью не менее 95%.

При этом осуществлен корреляционный анализ связей между всеми 22-х летними фрагментами временных рядов, отображающих изменения ОСО в различных сегментах озоносферы над Антарктикой, имеющих размеры $1^\circ \times 1^\circ$, в

период с 1979 г. по 2010 г., а также изменения GMSST, опережающие их по времени на 0 – 79 месяцев.

При выборе расположения сегментов озоносферы, изучение которых могло бы представлять наибольший интерес, рассчитаны меридиональные сечения функций пространственной корреляции изменений среднемесячных ОСО над Антарктикой. Установлено, что значение интервала их пространственной корреляции в любые месяцы и для любых значений долготы не превышает 10 градусов. Поэтому было признано целесообразным данные исследования проводить для сегментов озоносферы, центры которых расположены на параллелях 64.5 °S, 69.5 °S, 74.5°S, 79.5°S, 84.5 °S и 89.5 °S, и перекрывают всю Антарктику.

Для каждого такого сегмента рассчитаны функции взаимной корреляции изменений среднемесячных ОСО в том или ином месяце, для всех отрезков времени, сдвинутых по времени на 1 год, начиная от 1979-2000 гг. и 1989-2010 гг., а также соответствующих изменений индекса GMSST. По этим функциям определены значения сдвигов между рассматриваемыми процессами, при которых связи между ними за период современного потепления климата устойчиво усиливались и на отрезке времени с 1989-2010 гг. являются статистически значимыми.

При оценке значимости тех или иных статистических связей между изучаемыми процессами применялся критерий Стьюдента[9]. Пороговые значения коэффициента их взаимной корреляции, соответствующие достоверности вывода о значимости связи между ними, равной 0.95, определены с учетом числа степеней их свободы и составляют 0.42.

В качестве фактического материала использовались:

- полученные из [5] временные ряды среднемесячных значений ОСО, во всех рассматриваемых сегментах атмосферы над Восточной Европой, для всех месяцев, за период с января 1979 по декабрь 2010 г.;
- представленные в [8] временные ряды GMSST за все месяцы, соответствующие периоду с января 1972 по декабрь 2010 гг.

Результаты и их анализ. В соответствии с изложенной методикой рассчитаны взаимнокорреляционные функции всех рассматриваемых 22-х летних фрагментов временных рядов среднемесячных ОСО в различные месяцы, в каждом изучаемом сегменте атмосферы над Антарктикой, а также GMSST, опережающих их на 0-79 мес.

Их сопоставление показало, что наиболее существенное и устойчивое усиление статистических связей между рассматриваемыми процессами произошло в весенние месяцы (с сентября по ноябрь), а также в мае.

В качестве примера, на рисунке 2 приведены взаимно корреляционные функции изменений ОСО в сегменте атмосферы над пунктом с координатами 79.5°S и 3°W , в сентябре и мае, рассчитанные для отрезков времени 1979-2000 и 1989-2010 гг., а также GMSST.

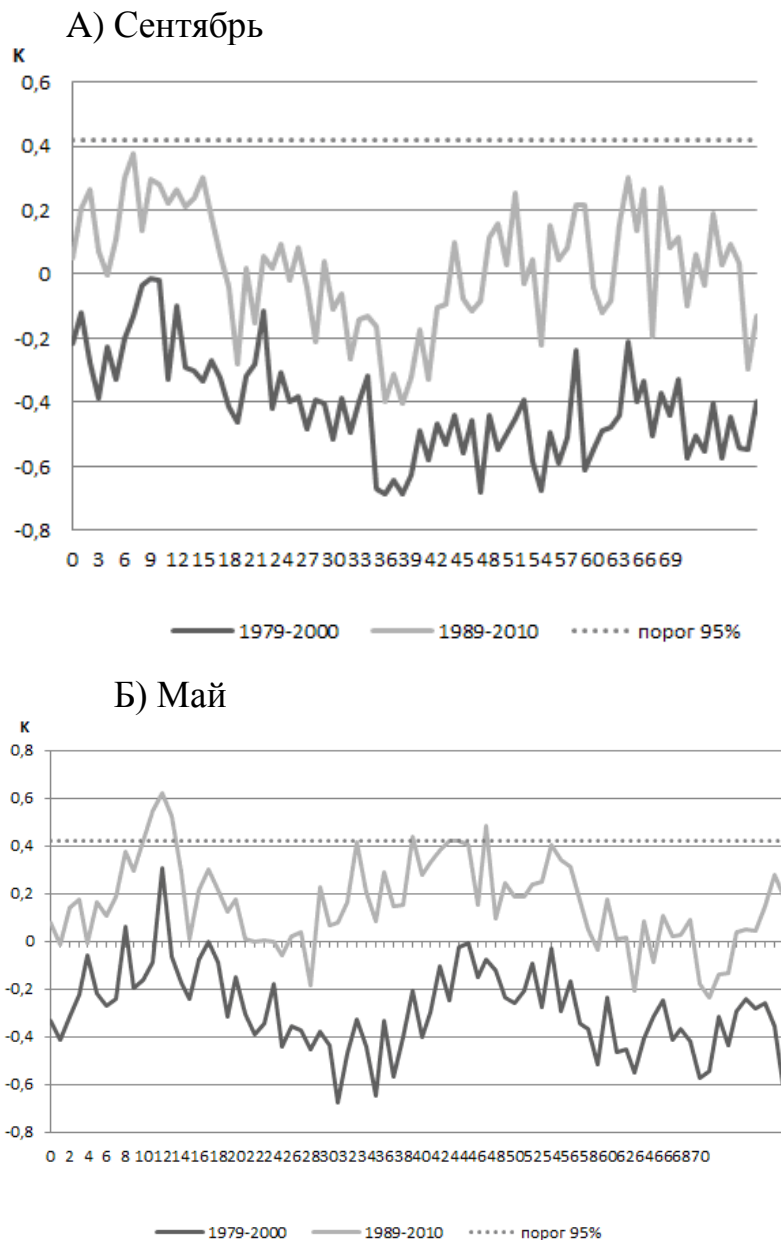


Рис. 1. Взаимнокорреляционные функции изменений GMSST и запаздывающих по отношению к ним среднемесячных ОСО над пунктом с координатами 79.5°S и 3°W , в сентябре и мае, рассчитанные для отрезков времени 1979-2000 гг. (ряд 1) и 1989-2010 гг. (ряд 2). Ряд 3 – 95% порог достоверной корреляции по критерию Стьюдента.

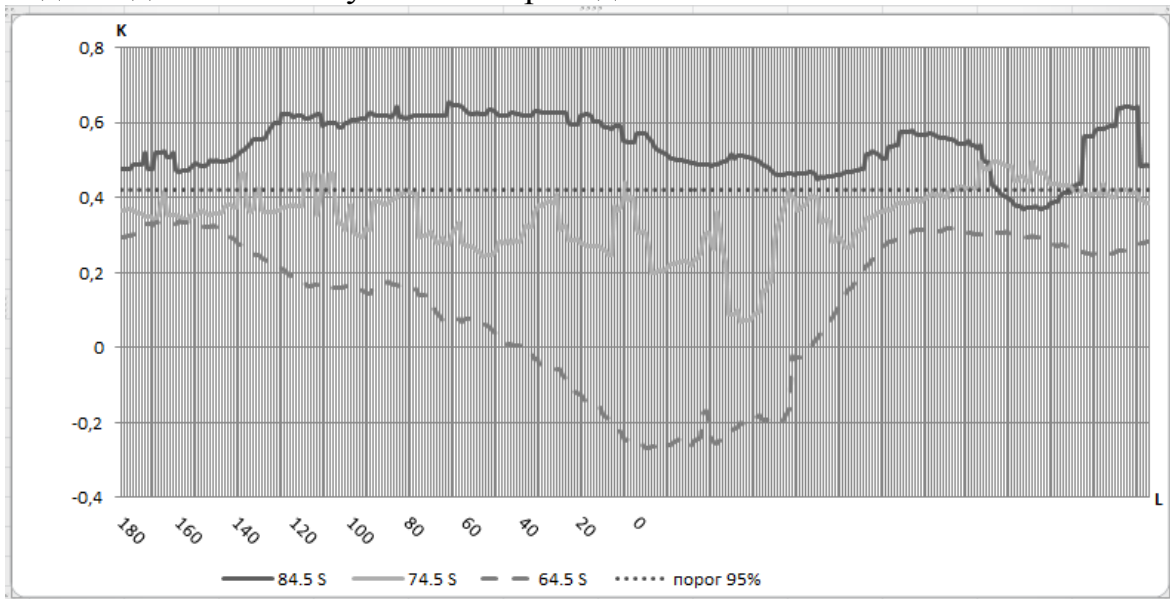
Из рисунка 1 видно, что значения коэффициентов корреляции рассматриваемых процессов, рассчитанные для отрезка времени 1989-2010 гг., при любых значениях сдвигов больше, чем оцененные для периода с 1979 по 2000 г..

В сентябре, а также октябре наиболее существенное увеличение их значений имеет место при условии, что фрагмент ряда GMSST опережает фрагмент ряда ОСО на 7 месяцев. В указанном случае их корреляция положительна, а вывод о ее значимости характеризуется достоверностью ощущимо выше 0.95.

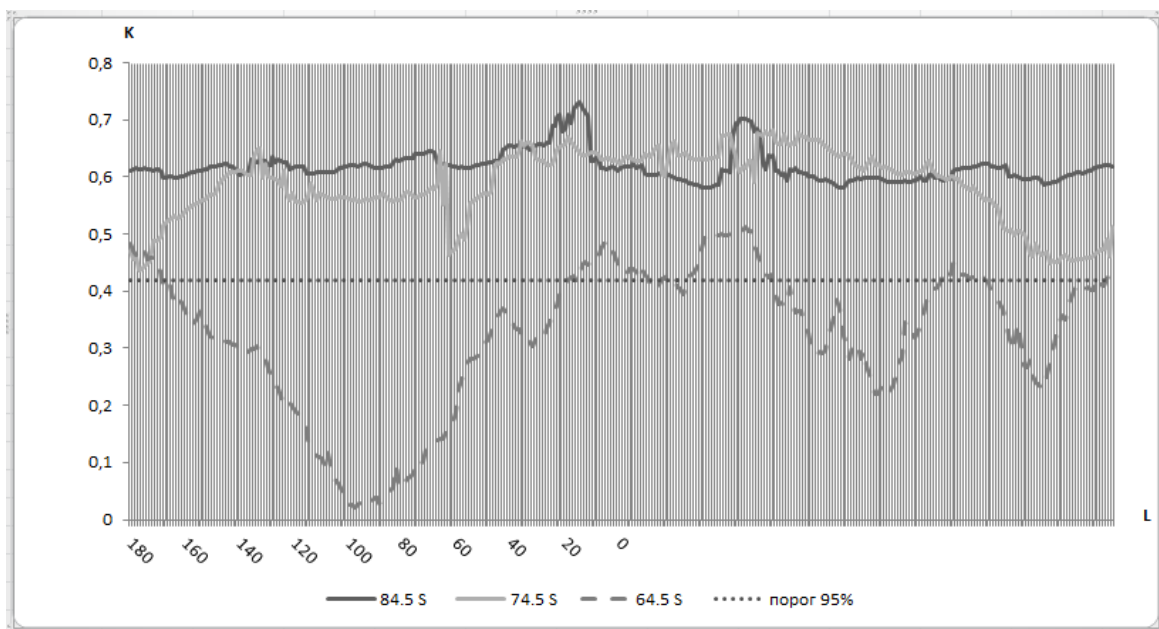
В мае аналогичное явление имеет место, при условии, что фрагмент ряда GMSST опережает фрагмент ряда ОСО на 12 месяцев.

В прочие месяцы значимых статистических связей между какими либо 22-х летними фрагментами временных рядов ОСО и GMSST не выявлено.

Для оценки устойчивости тенденций выявленных изменений статистических связей между рассматриваемыми процессами, для всех значений сдвигов между ними, при которых на отрезке 1989-2010 г. они были значимы, изучены зависимости коэффициента корреляции 22-х летних фрагментов их временных рядов от года начала фрагмента ряда ОСО. В качестве примера, на рисунке 2 упомянутые зависимости, соответствующие сентябрю и маю, приведены для того же пункта Антарктиды.



А) Сентябрь



Б) Май

Рис. 2. Зависимости от долготы сегмента атмосферы, с центром на параллелях 84.5 °S (ряд 1), 74.5 °S (ряд 2) и 64.5°S (ряд 3), соответствующих ему значений коэффициента корреляции изменений ОСО и GMSST в период с 1989 по 2010 гг. в сентябре (сдвиг 7 мес.) и мае (сдвиг 12 мес.).

Зависимости значений коэффициента корреляции изменений GMSST и ОСО в сентябре и мае, от долготы центра сегмента атмосферы, которому они соответствуют, при условии, что значения его широты составляют 84.5°S (ряд 1), 74.5°S (ряд 2) и 64.5°S , приведены на рисунке 2.

Из рисунка 2 следует, что в период 1989-2010 г. вывод о значимости статистических связей между изменениями GMSST, а также ОСО в сентябре являлся достоверным с вероятностью не менее 0.95 для большинства сегментов атмосферы, расположенных к югу от параллели 84°S .

Расчеты показывают, что достоверность аналогичного вывода для основной части сегментов атмосферы, расположенных к югу от параллели 74°S не ниже 0.85. При этом для сегментов, расположенных в Атлантическом секторе Антарктики она заметно ниже, чем для расположенных в ее Тихоокеанском секторе.

Подобные особенности свойственны также связям между изменениями GMSST и ОСО над Антарктикой в октябре. При этом, при прочих равных условиях в октябре связи между рассматриваемыми процессами обычно слабее чем в сентябре.

В мае вывод о значимости статистических связей между изучаемыми процессами достоверен с вероятностью не ниже 0.95 для всех сегментов атмосферы, расположенных к югу от параллели 74°S . При этом он столь же справедлив и для многих сегментов атмосферы, расположенных к югу от параллели 64°S .

Выявленные закономерности соответствуют современным представлениям о влиянии процессов глобального потепления климата на изменения характеристик циркуляции воздушных потоков в стратосфере над Антарктикой.

На протяжении полярной ночи над приполярными районами Антарктиды температуры стратосферного воздуха существенно снижаются, а его плотность увеличивается. При этом разность атмосферных давлений в стратосфере над ними и над Антарктической зоной конвергенции возрастает, что приводит к формированию циркумполярного антициклонического вихря.

По мере активизации этого вихря усиливается и его блокирующее воздействие на потоки воздуха, доставляющего в стратосферу над Антарктикой веществ, разрушающих озон.

С началом весны (в сентябре) энергия упомянутого вихря достигает максимума, поскольку при этом в нижних слоях тропосферы над Антарктической зоной конвергенции ощутимо повышаются температуры воздуха, что в стратосфере приводит к увеличению модуля барического градиента. В тоже время поток составляющих солнечной радиации, участвующих в реакциях цикла

Чепмена, возрастает, активизируя образование стратосферного озона. Баланс озона в стратосфере над Антарктикой становится тем более положительным, чем ощутимей потепление в Антарктической зоне конвергенции, чем больше GMSST. Именно этим объясняется положительность корреляции между изменениями ОСО над Антарктикой и GMSST.

В период полярного дня атмосферное давление в стратосфере над приполярными районами Антарктики снижается быстрее, чем над Антарктической зоной конвергенции. В результате этого существовавший ранее в стратосфере над Антарктикой антициклонический вихрь, деградирует, а на его месте формируется вихрь циклонический, вовлекающий в нее потоки воздуха с севера. В это время корреляция между изменениями ОСО и GMSST ослабевает и перестает быть значимой.

С наступлением осени циркуляция воздуха в стратосфере над Арктикой вновь переходит в зимний режим (формируется антициклонический вихрь, оказывающий блокирующее действие на потоки веществ разрушающих озон). Это действие тем сильнее, чем выше GMSST. Солнечная радиация, участвующая в образовании озона в стратосферу над Антарктикой продолжает поступать. В результате этого в мае баланс озона вновь становится положительным, что и объясняет выявленную положительную корреляцию ОСО в этом месяце и GMSST.

Полученные результаты позволяют предполагать, что выявленные связи между изменениями ОСО над Антарктикой в весенние и осенние месяцы, а также GMSST, носящие причинный характер, при дальнейшем потеплении климата будут усиливаться. Они свидетельствуют о том, что при дальнейшем потеплении климата вероятным является увеличение майских, сентябрьских и октябрьских ОСО над Антарктикой, в том числе в области озоновой дыры.

Устойчивое усиление рассматриваемых связей между изучаемыми процессами, наблюдавшееся в последние десятилетия, обуславливает целесообразность их учета при моделировании и долгосрочном прогнозировании пространственно-временной изменчивости ОСО над Антарктикой.

Выводы. 1) Статистические связи межгодовых изменений среднемесячных значений глобальных поверхностных температур поверхности Мирового океана, а также запаздывающих по отношению к ним на 7 месяцев ОСО над Антарктикой в сентябре и октябре, а также на 12 месяцев – в мае, на протяжении периода современного потепления климата устойчиво усиливались. Достоверность вывода об их значимости в период с 1989 по 2010 г. ощутимо превосходила 0.95.

2) При дальнейшем потеплении климата статистические связи между рассматриваемыми процессами еще более усилятся, что свидетельствует о целесообразности их учета при моделировании и прогнозировании.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Э.Л. Озонный щит Земли и его изменения / Э.Л. Александров, Ю.А. Израэль, И.Л. Кароль, А.Х. Хргиан. – СПб. : Гидрометеиздат, 1992. – 288 с.
2. Капица А.П., Гаврилов А.А. Подтверждение гипотезы о естественном происхождении Антарктической озоновой дыры // ДАН. – 1999. – 366, № 4. – С. 543-546.
3. Радионов В.Ф., Сабир Е.Е., Мишин А.А. Анализ характеристик радиационного режима и общего содержания озона на российских антарктических станциях/ Тезисы докладов научной конференции «Исследования и охрана окружающей среды Антарктики, г. Санкт-Петербург, 13-15 ноября 2002 г. – С. 89-91.
4. Звягинцев А.М., Зуев В.В., Крученицкий Г.М., Скоробогатый Т.В. О вкладе гетерофазных процессов в формирование весенней озоновой аномалии в Антарктиде // Исследование Земли из космоса. – 2002. – № 3. – С. 1-6.
5. <http://www.woudc.org>.
6. Груздев А.Н. Пространственно-временная динамика атмосферного озона и связанных с ним газовых примесей: Автореф. дис. д. ф.-м. н. / А.Н. Груздев. – М., 2007. – 48 с.
7. Enfield, D.B., A.M. Mestas, D.A. Mayer, and L. Cid-Serrano, 1999: How ubiquitous is the dipole relationship in tropical Atlantic sea surface temperatures? JGR-O, 104, P.7841-7848.
8. <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>.
9. Кендал М.Дж. Многомерный статистический анализ и временные ряды / М.Дж. Кендал, А. Стьюарт; пер. с английского Э.Л. Пресмана, В.И. Ротаря; под редакцией Колмогорова А.Н., Прохорова Ю.В. – М.: Наука, 1976. – 736 с.
10. S. Kang, L.M. Polvani, J.C. Fyfe and M. Sigmond, Impact of Polar Ozone Depletion on Subtropical Precipitation, Science, DOI: 10. – 2011. – P. 1126.

АНОТАЦІЯ

А.В. Холопцев, Т.С. Юсупова. Зв'язки змін розподілу середньомісячних значень ЗВО понад Антарктикою, а також глобальної поверхневої температури світового океану, при сучасному потеплінні клімату.

Статистичні зв'язки міжрічних змін глобальних поверхневих температур Світового океану, а також середньомісячних значень загального вмісту озону над Антарктикою що запізняються по відношенню до них на 7 місяців в вересні та жовтні, а також на 12 місяців у травні, за період сучасного потепління клімату суттєво посилюються. При подальшому потеплінні клімату вірогідним є їх ще більше посилення, що свідчить про доцільність їх урахування при моделюванні та прогнозуванні.

Ключові слова: Загальний вміст озону, Антарктика, глобальні поверхневі температури Світового океану, сучасне потепління клімату, кореляція.

SUMMARY

A.V. Cholopcev, T.S. Usupova. Relation of distribution monthly total ozone changer over the Antarctic and the global surface the temperature of the words ocean, under modern climate warming.

Statistical relations inter annual changes in global surface temperatures of the oceans, and also delayed with respect to them for 7 months in Septamber and October, and 12 the period of the modern warming significantly increased. With futher warming is likely to again even more, that suggests the advisabitily of talking them into account when modeling and forecasting.

Key words: total Ozone, Antarctica, global surface temperature of the oceans, the modern warming, correlation.