

В.Е. Тимофеев

РОЛЬ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В ФОРМИРОВАНИИ ОЗОНОВОЙ АНОМАЛИИ В ЮЖНОМ ПОЛУШАРИИ

Изучаются изменения циркуляции атмосферы, на фоне которых формировалась аномалия в поле общего содержания озона в Антарктике. Анализируется интенсивность циркумполярного вихря, проводится классификация форм циркуляции на уровне АТ-100 гПа по отдельным десятилетиям, привлекаются данные внешнего климатообразующего фактора (углового момента вращения атмосферы). Отмечается усиление аномальности циркумполярного вихря (ЦПВ) в последние десятилетия, связанное с его термической неоднородностью. Показана роль станции „Академик Вернадский” в идентификации озоновой аномалии в районе Антарктического полуострова.

Ключевые слова: циркумполярный вихрь, общее содержание озона, озоновая аномалия, очаг тепла (холода), индекс циркуляции, наиболее вероятное поле, угловой момент вращения атмосферы.

Введение

Понижение общего содержания озона (ОСО) наблюдается в атмосфере обоих полушарий в течение последних десятилетий, что связывается с накоплением хлора и брома, содержащих озоноразрушающие вещества (ОРВ). Производство большинства из этих газов регулируется Монреальским протоколом (1987 г.) и его поправками, и недавние наблюдения показывают снижение концентрации основных ОРВ.

С другой стороны, поле озона формируется в соответствии с циркуляцией атмосферы, а его колебания происходят при смене синоптических условий; в верхней тропосфере над полярными районами существуют циркумполярные вихри (ЦПВ), усиливающие недостаток ОСО и благоприятствующие развитию сезонных озоновых аномалий. Фактически, эти две гипотезы – химического и динамического влияния на

поле озона рассматриваются как основные в формировании его аномалий, прежде всего сезонной озоновой дыры в Антарктике.

История исследований начинается с первой половины XX века, и уже в то время по данным измерений в отдельных пунктах появилось понимание обусловленности колебаний ОСО с циркуляцией атмосферы [20, 34]. Было установлено, что изменчивость ОСО непосредственно связана с полями температуры и геопотенциала, в частности с пониженной температурой стратосферы в пределах ЦПВ (1, 17, 37).

Особенности пространственного распределения ОСО стало возможным изучать со времени проведения Международного геофизического года (МГГ) 1957-1959 гг. благодаря установлению сети наземных станций. Было показано, что в стратосфере над Антарктидой существует устойчивый ЦПВ, причем зональность движений значительно более выражена, чем в Северном полушарии [1, 10, 28].

Последующее накопление данных позволило обобщить тенденции ОСО и по данным сети спектрофотометров Добсона, охвативших период до начала 1980-х гг. не было найдено значительного тренда в ОСО, а в отдельных регионах отмечено даже незначительное его увеличение [16, 45]. Однако по данным двух станций в Антарктике („Халли” и „Argentine Islands” – нынешняя станция „Академик Вернадский”) за период 1958-1972 гг. был отмечен слабый отрицательный тренд ОСО, описана связь его изменения с динамикой ЦПВ, причем основные положения верны до настоящего времени [22, 23]. Однако пространственную картину явления в то время представить было затруднительно.

Первым сообщением о наличии устойчивого отрицательного тренда ОСО в Антарктике стала известная публикация ученых Британской антарктической службы (БАС) 1986 г., в которой было введено понятие “Озоновая дыра”, а также более детально объясняется динамика и фотохимия озона [23]. После идентификации озоновой аномалии состояние озонового слоя регулярно оценивается в публикациях ВМО, Бюллетенях БАС, Интернет-ресурсах и т.д. Статистически значимый отрицательный тренд ОСО (от -2,3 % до -6,2 %) по данным глобальной сети спектрофотометров Добсона отмечен в весенне-зимний сезон в течение 1969-1986 гг. [46]. В Южном полушарии величина тренда составляет около -4 % за десятилетие за период 1970-1996 гг., а по данным отдельных станций Антарктиды достигает 15 %. Глобальное ОСО достигло своего минимума в начале 1990-х гг. [17, 47]. Среди

публикаций, посвященных анализу аномалий ОСО в отдельных регионах, можно выделить выводы В. Фиолетова об общем понижении ОСО над Канадой на фоне высокой межгодовой изменчивости [27].

Первые оценки состояния озонового слоя по спутниковым данным Nimbus-7 подтвердили наличие отрицательной тенденции ОСО [47]. Однако было признано, что построение многолетнего ряда по данным дистанционных систем измерений невозможно из-за ограниченного их времени функционирования, и подчеркнута важность наземных измерений для контроля качества данных.

Смена знака отрицательного тренда ОСО в средних широтах северного полушария отмечена в середине 1990-х годов, а в Южном полушарии зафиксирована меньшая степень уменьшения по сравнению с 1980-ми гг. [36, 48]. Возрастание ОСО особенно заметно в нижних слоях стратосферы, где концентрация озона вернулась к уровню начала 1980-х годов. Высказывается предположение, что дополнительный вклад в рост ОСО вносит изменение циркуляции атмосферы [36, 40].

Вышеприведенные факты способствовали проведению многочисленных исследований причин формирования озоновой дыры, в частности уточнению химических и динамических процессов в области ЦПВ. В 1980-90-х гг. опубликована масса работ об основной роли фотохимии в уменьшении ОСО над Антарктикой, особое внимание было привлечено к стратосферной облачности, роли хлор-фтор-углеводородов (ХФУ). Одно из первых прямых доказательств того, что хлор из ХФУ ответственен за разрушение озонового слоя, приведено в [5]. Одним из необходимых условий уменьшения ОСО является понижение температуры в нижней стратосфере, при котором начинаются реакции разрушения озона с участием полярных стратосферных облаков [1, 15, 30, 31].

Поскольку ХФУ, выбрасываемые в атмосферу в результате антропогенной деятельности, были определены основными виновниками в формировании озоновой аномалии, проблема затронула экономическую и в конце концов политическую сферу. Были наложены ограничения на промышленное использование ХФУ, принят ряд международных договоров и конвенций. Это вызвало неоднозначную реакцию, так же как в целом необоснованность многих прогностических соображений ИРСС.

Возможно, поэтому в одной из монографий российских авторов [5] в вопросе интерпретации глобального потепления усматривается

политический заказ, в связи с очевидной неспособностью современных моделей спрогнозировать поведение климатической системы. По оценке авторов, природные процессы представляют собой квазипериодические чередования более теплых и более холодных периодов.

Интересным фактом в пользу естественных причин озоновой аномалии явилось обнаружение хлор-фтор-углеводородов природного происхождения в образцах льда, отобранных В. Ф. Грищенко (УкрНИГМИ) на леднике в районе антарктической станции „Академик Вернадский” [4].

В последнее десятилетие возросло количество исследований циркуляции атмосферы, поиск аналогичных процессов в прошлом, а также моделирование условий, приводящих к формированию озоновой аномалии [19, 21, 27, 44], поскольку роль атмосферной циркуляции в формировании поля ОСО до конца не выяснена. Перенос свойств (в том числе и озона) в ЦПВ зависит от степени его преобразования (меридионального или зонального типа), формируя температурный фон внутри вихря. В годы с большей меридиональностью формируется положительная аномалия температуры в ЦПВ, что подавляет развитие полярных стратосферных облаков. Формируются стратосферные потепления, приводящие к меньшей продолжительности зимнего ЦПВ (арктический ЦПВ подвержен более частым потеплениям) [12, 28]. Наоборот, выраженная зональность приводит к изоляции ЦПВ и прекращению переноса озона, понижению температуры в ЦПВ и развитию полярных стратосферных облаков. ЦПВ в течение антарктической весны (1979-2001 гг.) стал более интенсивным и холодным и его разрушение происходит позже, чем в предыдущие десятилетия [27, 28, 42]. Параллельно, в последнее десятилетие отмечена тенденция к более поздним срокам разрушения вихря в Арктике.

Изучению роли циркуляционных процессов в колебаниях ОСО посвящены многочисленные исследования российских авторов, в которых подтверждены и уточнены связи колебаний ОСО в пределах разных воздушных масс, центров действия атмосферы [9, 11-13]. В ряде работ исследованы аномалии ОСО в связи с аномалиями в циркуляции атмосферы над Евразией, причем установленные связи имеют значение в долгосрочных прогнозах и исследовании климата [12].

Для совершенствования долгосрочных прогнозов могут быть полезными связи, установленные над Северным полушарием между

сроками весенней перестройки циркуляции в стратосфере и последующим преобразованием элементарных циркуляционных механизмов [3]. На возможность использования формы ЦПВ в среднесрочных прогнозах указывается в [5].

Озоновая аномалия в Антарктике признана важнейшей составляющей планетарного климата, реагирующая на внутренние и внешние климатообразующие факторы. Так, была найдена связь аномалии в озоновом слое с вулканическими извержениями, квазидвухлетним колебанием и Эль-Ниньо [1, 5, 15, 18]. Если учесть выводы [38], Эль-Ниньо определяет расширение ячейки Хедли и усиление зонального потока – эффекты, возглавляющие перечень крупномасштабных изменений в атмосфере в современную климатическую эпоху. В [1] сделан вывод, что в периоды аномалий ОСО обострялась западная фаза квазидвухлетнего колебания, которая усиливала зональный перенос и ослабляла межширотный обмен в нижней стратосфере.

В ряде статей обобщены современные представления о роли озонового слоя в климатической системе с использованием данных наблюдений и моделирования. Так, моделирование, проведенное в рамках ИРСС за период 1950-1999 гг. [44], воспроизводит в ЮПО сезонность изменений в озоновом слое и его сопряженность с интенсивностью зональной циркуляции, которая выражается индексом антарктического колебания (ААО). Большинство моделей воспроизводят сезонность тренда, с его максимумом в летний сезон (декабрь-февраль), со снижением интенсивности зонального переноса в умеренных широтах. Понижение ОСО происходит вместе с усилением струйного течения (СТ) и интенсификацией южной ветви течения океанского глобального переноса. Таким образом, разрушение озонового слоя играет важную роль в изменении атмосферной и океанической циркуляции в последние десятилетия.

Предметом дискуссии является роль увеличения парниковых газов в поддержании озоновой аномалии. Для изучения влияний внешних воздействий на зональный поток проведено ансамблевое моделирование, в целом восстанавливающее особенности циркуляции атмосферы и наблюдаемое распределение озона при выбросе парниковых газов, сульфат-аэрозолей, вулканических аэрозолей, солнечной активности [14]. Наблюдаемое усиление зонального переноса в Южном полушарии в

течение последних десятилетий сопровождается усилением полярного вихря и одновременно меньшим поступлением озона. Установлено, что изменения в поле озона вносят большой вклад в наблюдаемое усиление летнего ЦПВ над ЮПО во второй половине XX века в условиях увеличения выбросов парниковых газов.

Таким образом, кроме того, что озоновая дыра является важнейшей составляющей климатической системы, изменение в поле ОСО неразрывно связывается с изменениями в нижней тропосфере (потеплением).

По выводам многих авторов, полного объяснения формирования аномалии в озоновом слое не имеется, несмотря на значительные успехи моделирования. Ряды непрерывных данных ОСО и других параметров атмосферы не столь продолжительны, чтобы по ним можно было сделать достоверные выводы о наличии многолетних колебаний.

Целью работы было выяснение роли циркуляции атмосферы, в частности, характеристик ЦПВ в формировании озоновой аномалии, с привлечением данных как внутренних, так и внешних климатообразующих факторов. Также уточняется роль украинской антарктической станции „Академик Вернадский” в идентификации и прогнозе явлений, связанных с озоновой аномалией.

Используемые данные и методика

Методика исследования включает анализ крупномасштабных характеристик полей геопотенциала и температуры воздуха в верхней тропосфере по отдельным десятилетиям, включающим период развития озоновой дыры. Анализируются индексы зональной циркуляции по различным створам (меридианам), сопоставляются поля геопотенциала наиболее вероятного класса в сезон развития озоновой дыры и приводятся примеры регистрации аномалии ОСО на станции „Академик Вернадский” с использованием средних суточных данных ОСО по спектрофотометру Добсона (N 031).

В работе использованы данные Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF), реанализ ERA40 (горизонтальный шаг сетки 2,5 °) 1957-2002 гг., Interim (шаг сетки 1,5 °) 2001-2010 гг. Индексы зональной циркуляции рассчитывались в ЮПО по 12 отдельным меридианам с шагом 30° с осреднением в широтной зоне 50-80 ° ю. ш. При этом анализ проводился между периодами 1957-1982 (слабые

изменения ОСО) и 1983-2002 гг. (период озоновой аномалии). Подобная работа с расчетом индексов циркуляции выполнена для Арктики в [5].

Данные о площади озоновой дыры получены по данным системы Nimbus-7 и полярно-орбитальных спутников NOAA (Центр предсказания климата, <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere>), а поля геопотенциала и температуры воздуха получены с помощью ресурса Climate Prediction Centre, <http://www.esrl.noaa.gov>.

Интенсивность ЦПВ и термического вихря рассчитывалась в целом согласно традиционной методике расчета интенсивности синоптического образования по 12-точечной схеме расчета (через 30° долготы).

$$I = \frac{\sum_{\lambda=1}^{12} (H_{\lambda} - H_0)}{12},$$

где H_{λ} – величина геопотенциала на 60° ю. ш. соответствующего меридиана, H_0 – величина геопотенциала в центре ЦПВ.

Методика отбора наиболее вероятных полей давления или геопотенциала базируется на применении набора критериев геометрического подобия полей, которые рассчитываются на основе знака аномалии для каждого узла регулярной сетки от зональных (ϕ) или меридиональных (λ) средних [9, 33]:

$$\rho_{\phi} = \frac{n_{\phi+} - n_{\phi-}}{n_{\phi+} + n_{\phi-}},$$

$$\rho_{\lambda} = \frac{n_{\lambda+} - n_{\lambda-}}{n_{\lambda+} + n_{\lambda-}}$$

где $n_{\phi+}$ – количество совпадений знаков аномалии геопотенциала, $n_{\phi-}$ – количество несовпадений знаков аномалии геопотенциала в сравниваемых полях.

Применительно к циркумполярной циркуляции, классификацию полей геопотенциала удобнее проводить посредством отклонения данных в узлах сетки от его зональных средних значений. Таким образом, для проведения классификации в качестве основного использовался зональный критерий, для полей наиболее вероятного класса принимается $\rho_{\phi} \geq 0,30$ [7]. Данный критерий является удобной характеристикой положения ЦПВ и в частности его аномального положения (отклонения от полюсной позиции).

Результаты работы

Как известно, поле температуры воздуха в полярных районах характеризуется очагом холода вблизи полюса, а зональный контраст определяет западно-восточный перенос с учетом действия силы Кориолиса. Однако в некоторые годы формируется аномалия в положении ЦПВ, прежде всего в связи с отступлением очага холода от околорполюсной позиции. Проследим изменение динамических и термических характеристик вихря между десятилетиями в октябрь-ноябре, с учетом того, что в эти месяцы с начала 1980-х гг. развивается озоновая аномалия.

В 1961-1970 гг. знак аномалии температуры воздуха над центральной частью Антарктиды положителен по сравнению со стандартным климатическим периодом 1961-1990 гг., и изотермы практически зональны (рис. 1). Начиная с 1981-1990 гг. над Антарктидой проявляется очаг холода, обостряя зональный контраст и усиливая западно-восточный перенос в западном секторе Антарктики. В 1991-2000 и 2001-10 гг. очаг холода смещается в Восточный сектор Антарктики, а в западном секторе существует очаг тепла над южной акваторией Тихого океана – таким образом формируется диполь, с которым связывается усиление ЦПВ. Отмечено перемещение к востоку областей холода и тепла между 1991-2000 и 2001-2010 гг., а область максимальных градиентов в 2001-2010 гг. располагается над Западной Антарктикой. Резкий контраст отмечен между очагом тепла над тропической областью Тихого океана (районом-источником озона) и антарктической областью, что приводит к усилению зонального потока. Как известно, с усилением западного переноса в нижней тропосфере в западном секторе (особенно по сравнению с условиями 1961-1970 гг.) со смещением ПВФЗ к югу, связывается региональное потепление в нижней тропосфере на Антарктическом полуострове (9, 24, 33). В верхней тропосфере и нижней стратосфере происходит обратная тенденция – к похолоданию, что связывается, прежде всего, с уменьшением ОСО [5, 42].

Таким образом, в течение рассматриваемого периода происходит постепенное обострение области холода в центре ЮПО. Отметим также, что очаг холода смещен в восточный сектор Антарктики, ориентируясь к тропосферной области холода над ледниковым куполом со средней высотой 3400 м, над которым в условиях мощной приземной инверсии

отмечается отсутствие тропопаузы, что объединяет движение тропосферы и нижней стратосферы.

Далее рассмотрим динамическую и термическую интенсивность ЦПВ в месяцы развития озоновой дыры (октябрь-ноябрь), а также величину углового момента вращения атмосферы относительно Земли, связанного с внешним климатообразующим фактором [10, 25]. Наиболее интенсивный термический вихрь отмечен в 1961-1970 гг., обусловив также рост интенсивности динамического вихря (рис. 2). Отметим, что это, возможно, явилось причиной регистрации низкого ОСО на одной из станций Восточной Антарктиды [8].

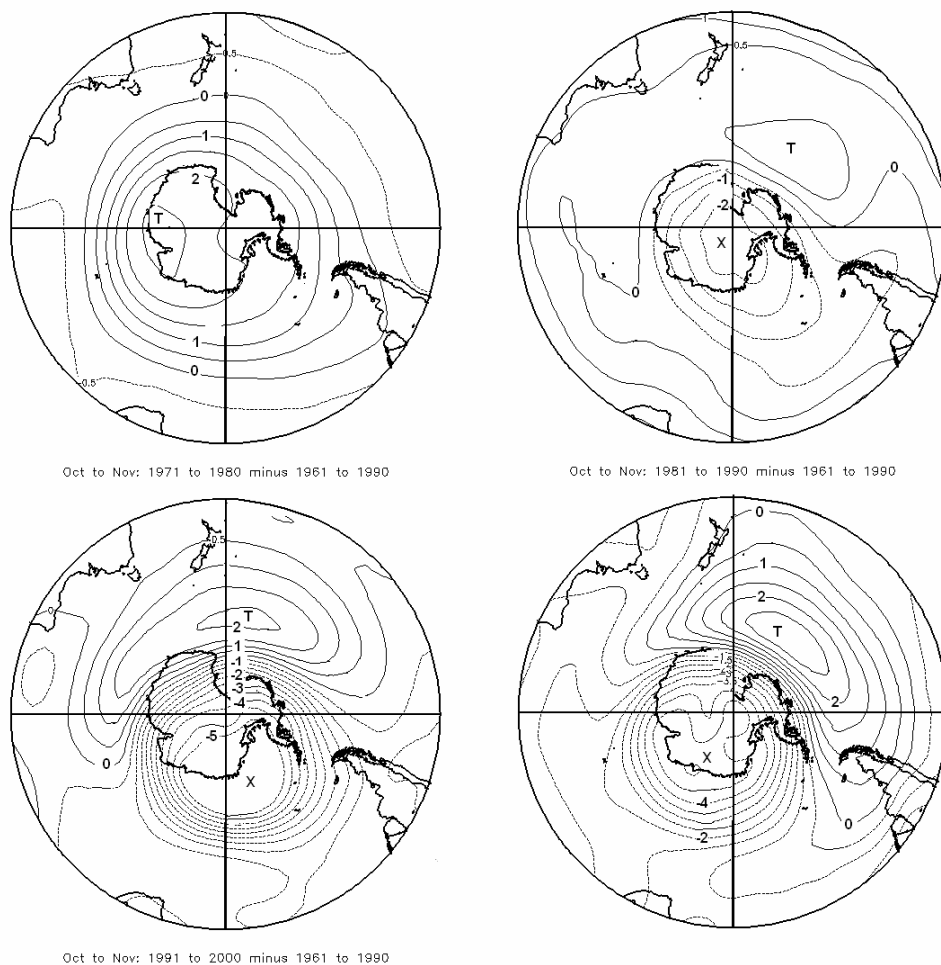


Рис. 1. Аномалия температуры воздуха на уровне 100 гПа, октябрь-ноябрь в отдельные десятилетия 1971-2010 гг. Изаномалы проведены через 0,5 °С, обозначены через 1° С. Область холода – “X”, область тепла – “Т”.
 Источник: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/composites/>

После некоторого ослабления интенсивности вихря в 1967-1972 гг. вновь происходит усиление ЦПВ, которое достигает максимума к началу 1980-х годов – моменту начала регистрации озоновой аномалии. Резкие колебания углового момента вращения атмосферы в 1987-1990 гг., названные Н.С. Сидоренковым [10] кратковременными флуктуациями, совпадают во времени с колебаниями интенсивности ЦПВ (рис. 2). С начала 1990-х годов отмечается замедление углового момента вращения атмосферы, интенсивность ЦПВ убывает, а площадь озоновой дыры далее не увеличивается.

Современный период после 2002 г. характеризуется снижением межгодовых изменений интенсивности ЦПВ, аналогично колебаниям средней месячной и годовой температуры по данным приземных измерений [9].

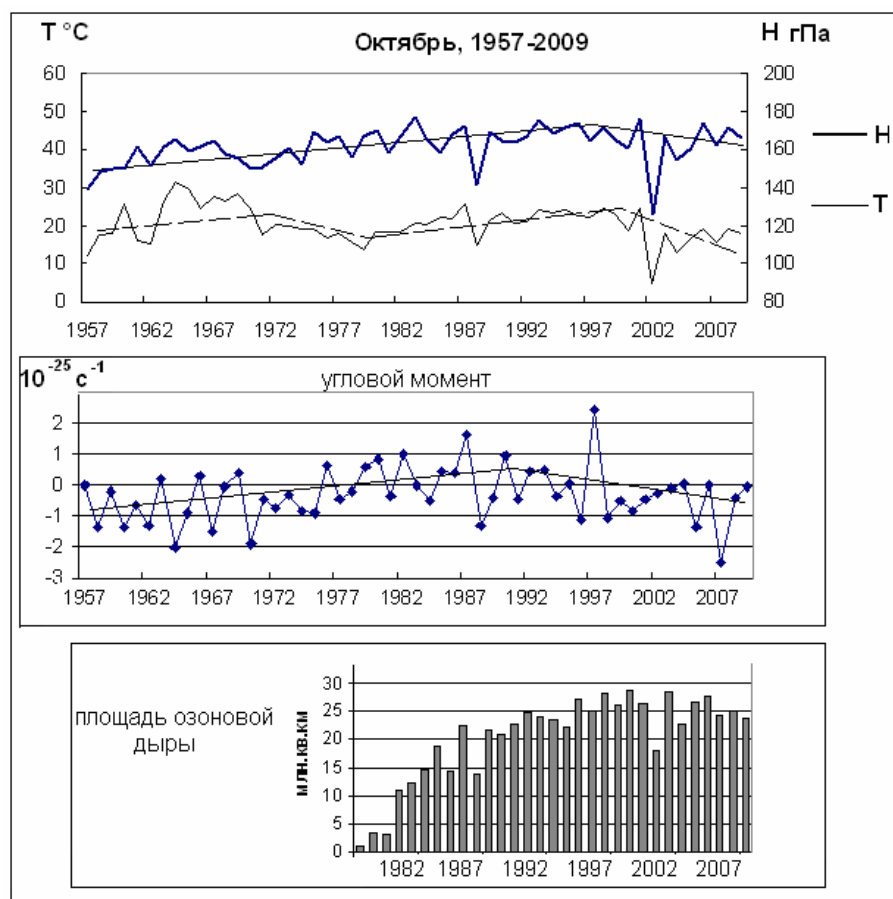


Рис. 2. Интенсивность ЦПВ (H), лапласиана температуры (T) в ЦПВ, угловой момент вращения атмосферы относительно Земли (среднее за август-октябрь, уменьшен в 10^{25} раз), 1957-2010 гг., максимальный размер озоновой дыры, 1979-2009, октябрь

Тем не менее, интенсивность ЦПВ в целом остается на уровне 1990-х гг., и только дальнейшие наблюдения могут подтвердить сохранение устойчивой смены знака тренда.

Таким образом, появление “озоновой дыры” происходило на фоне усиления динамической и термической характеристик вихря, а также увеличения углового момента вращения атмосферы, связанного со скоростью вращения Земли.

Далее дополним исследование анализом индексов зональной циркуляции на уровне АТ-100 гПа по долготным створам. В течение центрального месяца южной весны (октябрь) отмечено усиление зональности на всех меридианах в 1957-2001 гг. Смена знака тренда отмечена на створах 210 и 240° ю. ш. (рис. 3). Это свидетельствует о том, что первые десятилетия наблюдений (1957-1970 гг.) характеризуются значительно меньшей степенью зональности, особенно в западном секторе Антарктики, через который происходит перенос обогащенной озоном ВМ во время заполнения ЦПВ.

Таким образом, в десятилетия перед обнаружением озоновой дыры наибольшее усиление зонального потока в августе происходило в Тихоокеанском секторе, тропические районы которого, как известно, являются основным источником ОСО для ЮПО.

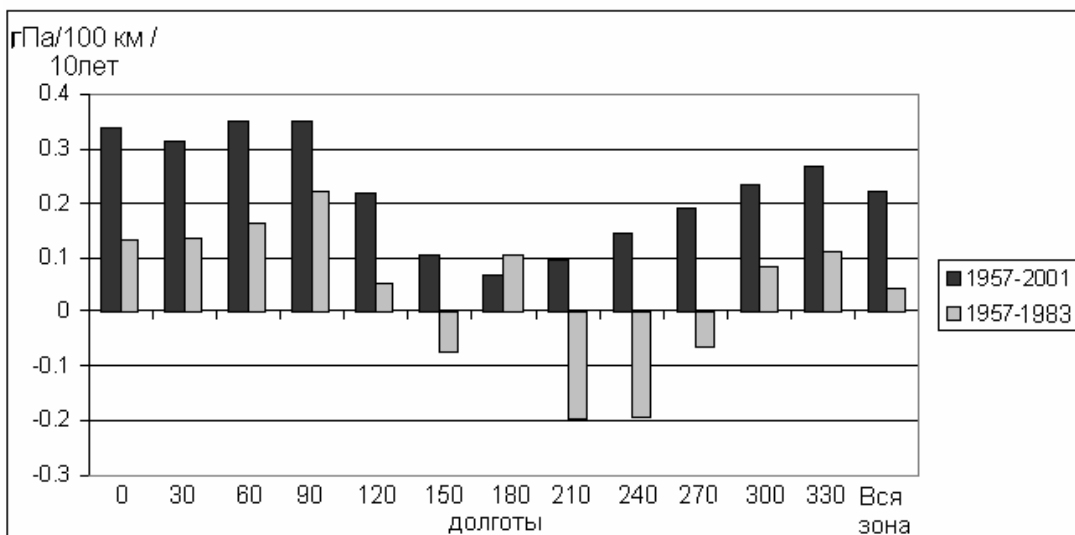


Рис. 3. Многолетнее изменение индексов зональной циркуляции на уровне АТ-100 гПа (коэффициенты линейного тренда), по отдельным меридианам через каждые 30°, и для всей зоны 50-80° ю. ш., октябрь (1957-2001 и 1957-1983 гг.)

Меньшая величина адвекции ОСО в область ЦПВ в конце зимы способствует быстрому формированию озоновой аномалии. Усиление зональности в последующие месяцы приводит к изоляции воздуха в ЦПВ, затруднению межширотного обмена и, очевидно, этот механизм привел к задержке времени разрушения зимнего вихря и к увеличению частоты регистрации явлений, соответствующих категории озоновой дыры (менее 220 ед. Д.).

Вышеприведенные исследования велись в предположении циркумполярности движений, т.е. локализации центра ЦПВ в районе полюса, что практически всегда наблюдается на картах среднего геопотенциала. Поскольку осреднение обычно приводит к сглаживанию планетарных волн, перемещающихся в зональном направлении, ежедневные поля могут значительно отличаться от средних. Поэтому необходимо иметь поля наиболее вероятного класса, полученные в результате классификации атмосферной циркуляции. Классификация была проведена для полей геопотенциала на уровне АТ-100 гПа в месяцы развития озоновой аномалии. Как следует из рис. 4, в сентябре и октябре 1971-1980 и 1981-1990 гг. форма полей наиболее вероятного класса на данном уровне практически циркумполярна, а в ноябре более возмущена, с отклонением центра ЦПВ в Западный сектор к морю Уэдделла.

С 1991-2000 гг. форма ЦПВ продолжает испытывать преобразования во все весенние месяцы со смещением в восточный сектор и с появлением в 2001-2010 гг. отдельных центров в каждом из секторов Антарктики. Аналогичная асимметрия отмечается и в поле ОСО. Наиболее асимметричное поле геопотенциала в ноябре, причем смещение ЦПВ от полюса обуславливает сдвиг западно-восточного переноса и СТ к северу в Южной Атлантике и Индийском океане, и к югу в Тихоокеанском секторе. Отмечается также локализация одного из центров ЦПВ над морем Уэдделла, с непосредственным влиянием на Антарктический полуостров.

В 2001-2010 гг. во все месяцы отмечается смещение центра вихря в восточный сектор с наличием нескольких центров пониженного геопотенциала, причем в ноябре оба расположены в Восточном секторе. Таким образом, наиболее аномальное поле (в смысле смещения от полюса) отмечено в ноябре – последнем месяце регистрации дыры, когда ЦПВ прогревается и формируются значительные контрасты температуры, и постепенно начинается заполнение озоновой аномалии.

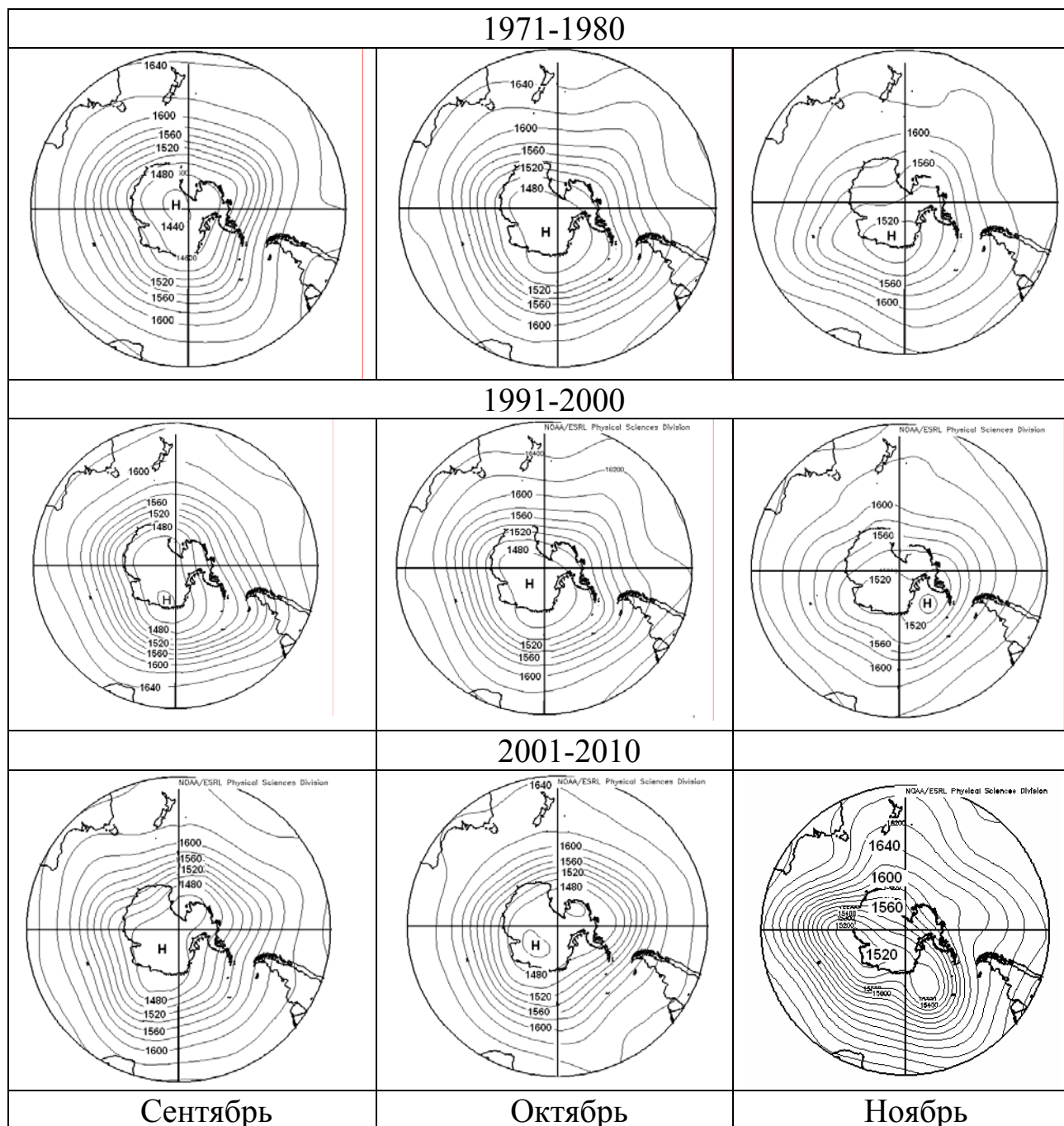


Рис. 4. Наиболее вероятные поля геопотенциала на уровне АТ-100 Гпа (изолинии проведены через 20 гп. дам, обозначены через 40 гп. дам), сентябрь, октябрь, ноябрь, 1971-1980, 1991-2000 и 2001-2010 гг. <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/composites/>

Далее покажем роль станции „Академик Вернадский” в регистрации аномалий ОСО. На рис. 5 показан ход среднего суточного ОСО с максимумом 3 октября и минимумом 26 октября 2002 г. Проанализируем условия циркуляции атмосферы во время наступления экстремумов ОСО.

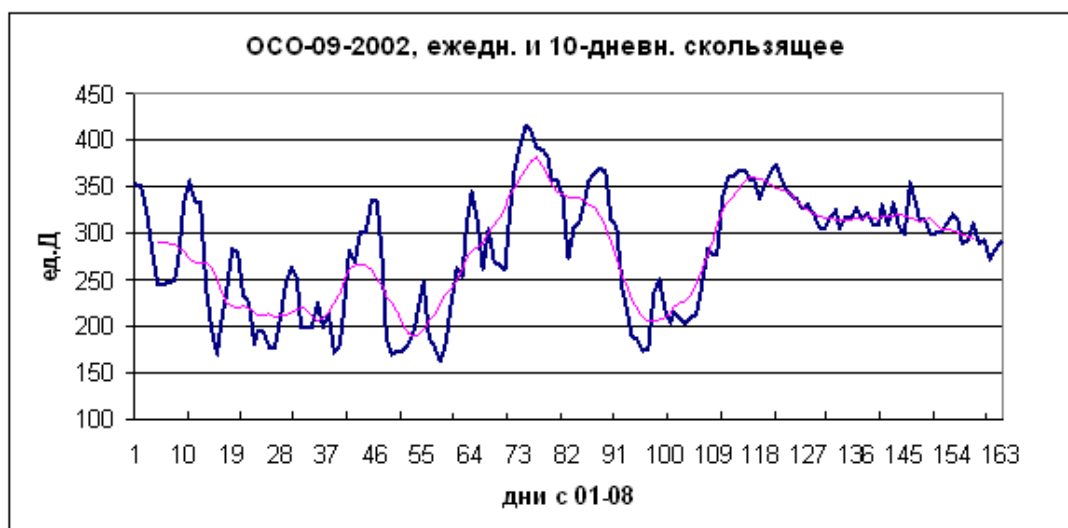


Рис. 5. Общее содержание озона по данным станции „Академик Вернадский”, август-декабрь 2002 г., средние суточные и 10-дневные скользящие средние значения

Максимум СО в начале октября над Антарктическим полуостровом связан с тихоокеанским гребнем, который прослеживается на всех уровнях тропосферы до нижней стратосферы, АТ-100, 500 и 1000 гПа и обеспечивает приток озона из тропиков (рис. 6). Минимум СО в третьей декаде месяца формируется при смещении ЦПВ в сторону Антарктического полуострова, при этом крупномасштабная ложбина в тихоокеанском секторе просматривается от уровня земли до АТ-100 гПа. При перемещении ложбины над Антарктическим полуостровом СО по данным станции „Академик Вернадский” резко снижается. Период времени между экстремумами СО (около 23 дней) является половиной периода обращения синоптической волны в ЦПВ. Отмеченные колебания связываются с перемещением ВМ, обогащенной озоном в гребне и обедненной в ложбине, являющейся частью ЦПВ. Как уже упоминалось, в 2002 г. наблюдалось смещение ЦПВ от полюсной позиции с разделением на два центра [19, 41].

Отметим, что ранее в работах автора подтверждена связь колебаний СО с синоптическими условиями в тропосфере в Антарктике, выделены фазы развития ЦПВ и типовые профили СО по данным станции „Академик Вернадский” (11). Понижение СО в августе-сентябре характеризует усиление ЦПВ, переход к возрастанию СО на фоне значительных колебаний в октябре-первой половине ноября – начало заполнения озоновой аномалии, уменьшение межсуточных колебаний на

высоком фоне ОСО (более 300 ед.Д.) со второй половины ноября – заполнение аномалии и переход к летнему типу ЦПВ (рис. 5).

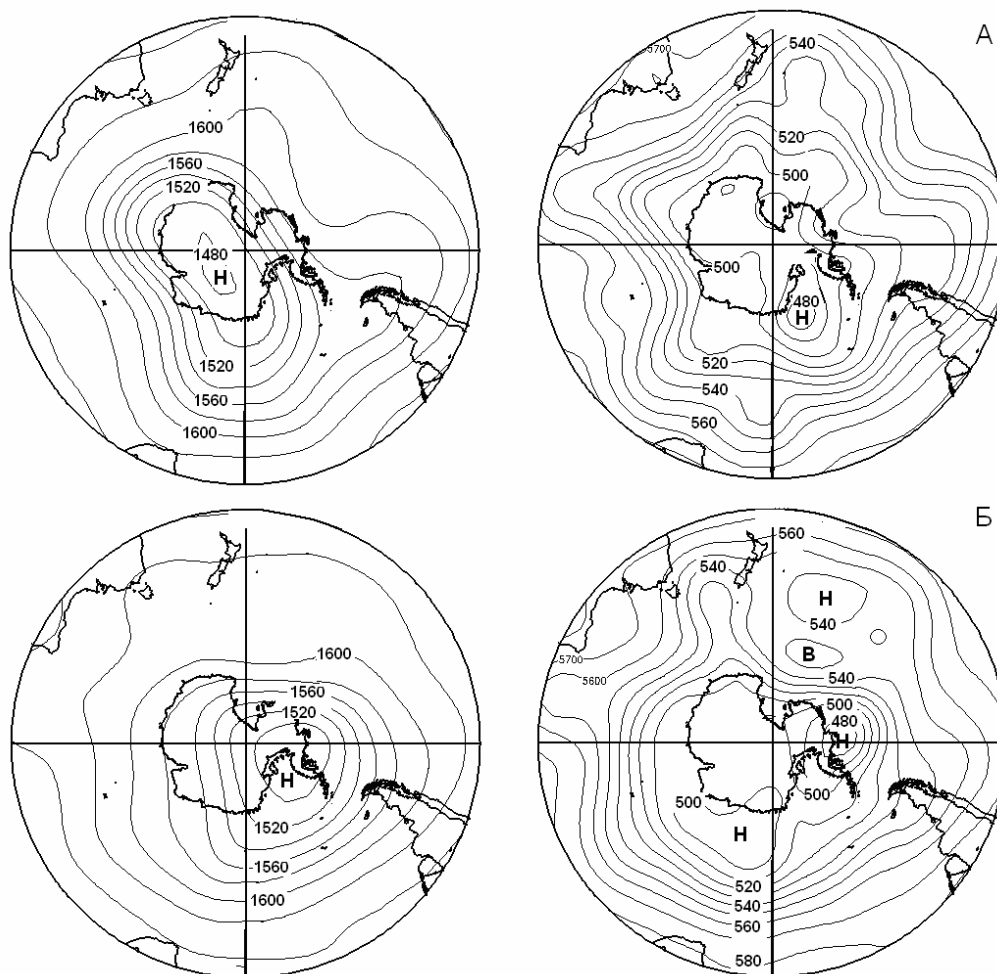


Рис. 6. Карты АТ-100 (слева) и 500 гПа (справа), 26-10-2002 г. (А) и 10-03-2002 г. (Б). Изолинии проведены через 40 гп. дам

Другим атмосферным показателем состояния озонового слоя является тропопауза как граница между различной концентрацией озона в стратосфере и тропосфере [43]. Изменения в высоте тропопаузы могут происходить резко и сопровождаться значительными колебаниями ОСО, до 70 единиц Добсона (ед. Д.) всего за 6-12 часов, что вызвано сменой барических образований или прохождением атмосферных фронтов, например холодного фронта второго рода [12, 13].

Обсуждение

Озоновая аномалия активизировалась на фоне роста динамического, термического вихря и углового момента вращения атмосферы. Однако термический вихрь был наиболее развит в период МГГ и в 1961-1970 гг.,

а найденные свидетельства асимметрии ЦПВ и его разделения на несколько центров в 1951-60-х гг., аналогично современному периоду [36], а также данные отдельных станций могут свидетельствовать о проявлениях озоновой аномалии в середине XX века. Подтверждением этого является регистрация ОСО 128 ед. Д. на одной из станций Восточной Антарктиды („Мирный“) задолго до объявления озоновой аномалии в Антарктике.

Однако очевидно, если озоновая аномалия в то время и развивалась над Восточной Антарктидой, то она не достигала краевых частей Западной Антарктики. В 1970-х и 1980-х гг. озоновая дыра достигла района Антарктического полуострова и была зафиксирована по данным станций „Халли“ и „Академик Вернадский“. Расположение украинской станции является показательным для описания эволюции озоновой аномалии, в связи с перемещением высотных ложбин и (или) локализацией одного из центров ЦПВ в этом районе. В последние годы озоновая дыра не обостряется так, как это было в 1980-х и начале 1990-х, с достаточно предсказуемым временем ее наступления и заполнения, в зависимости от типа циркуляции атмосферы и особенно формы ЦПВ.

Вместе с тем изменения, происходящие в климатической системе, показывают, что многолетние характеристики озоновой аномалии прямо следуют за изменениями в нижней тропосфере – усиление озоновой дыры совпадает с усилением ЦПВ, зонального переноса во всей тропосфере и потеплением в западной Антарктике, в частности на Антарктическом полуострове [9, 24, 32]. Например, 1987 г. стал одним из наиболее холодных на фоне развитого ЦПВ, а 1988 – теплым, при ослаблении ЦПВ.

В последнее десятилетие размер и продолжительность антарктической озоновой дыры не увеличивается, а в отдельные годы она формируется поздно и значительно меньше по размеру, как в 2002 и 2004 гг. Такое поведение дыры во многом объясняется условиями атмосферной циркуляции [35, 41], в частности, преобразованием поля геопотенциала в ЦПВ, его разделением на несколько центров, а также аномально высоким ОСО в месяцы до начала появления дыры в Южной полярной области (ЮПО). Современный период характеризуется также уменьшением межгодовых колебаний ЦПВ и температуры в нижней тропосфере.

По данным отчета ВМО 2007 г. в ближайшие два десятилетия не ожидается заполнения озоновой дыры над Антарктикой [43]. ОСО в

Антарктике, согласно прогнозам, может вернуться к уровню 1980 г. около 2060-2075 г., примерно на 10-25 лет позже, чем предполагалось в оценке за 2002 г. Результаты моделирования [14] показывают, что озоновая дыра стабилизируется и в конечном итоге восстановится до доиндустриального уровня в течение XXI века, и увеличение выбросов парниковых газов будет продолжать активизировать полярные вихри в течение XXI века на фоне повсеместного возрастания температуры в Южном полушарии [11, 15, 34]. Немаловажно также и то, что в данный момент, очевидно, ожидаемые последствия соблюдения Монреальского протокола совпадают с естественными изменениями атмосферной циркуляции, благоприятствующей стабилизации озоновой аномалии.

Выводы

Озоновая аномалия в Антарктике сформировалась на фоне усиления зональной циркуляции в пределах ЦПВ, роста интенсивности термического и динамического вихря, а также углового момента вращения атмосферы. Интенсивность зонального потока особенно возросла в начале зимы в Тихоокеанском секторе.

Озоновая аномалия достигла максимального развития к середине 1990-х гг., и до настоящего времени наблюдается стабилизация. Параллельно, в последнее десятилетие не отмечается усиления интенсивности ЦПВ, на фоне меньшей межгодовой изменчивости.

Вместе с тем, в последнее десятилетие отмечается преобразование поля геопотенциала в ЦПВ, с разделением на несколько центров и смещением от полюсной позиции, особенно в ноябре, последнем месяце регистрации озоновой аномалии. Аномалия развития ЦПВ, в отличие от предыдущих десятилетий, связана с формированием диполя в поле аномалии температуры воздуха между западным и восточным секторами Антарктики.

Период обострения озоновой дыры совпадает с усилением зонального переноса и потеплением в Западной Антарктике, в частности на Антарктическом полуострове. Аномалия ОСО над этим районом формируется под влиянием крупномасштабной атмосферной циркуляции. Данные станции „Академик Вернадский” могут быть использованы для прогноза озоновой аномалии, с учетом формы ЦПВ и скорости перемещения планетарной волны. Прогноз наступления озоновой аномалии над Антарктическим полуостровом может быть проведен при

помощи полученных типов ЦПВ и их преобразования в течение весеннего сезона.

Климатический прогноз эволюции озоновой дыры зависит от способности моделей воспроизвести изменение атмосферной циркуляции в Южном полушарии.

* *

1. Александров Э. Л., Израэль Ю. А., Кароль И. Л., Хргиан А. Х. Озонный щит земли и его изменения. – С. Пб.: Гидрометеиздат, 1992. – 288 с.
2. Асатуров М. Л., Будыко М. И., Винников К. Я. Вулканы, стратосферный аэрозоль и климат Земли. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 256 с.
3. Бакулина Е. А., Дунаева Е. А., Угрюмов А. И. Связь весенних перестроек циркуляции в стратосфере с характером процессов в тропосфере в марте-июне // Метеорология и гидрология. – 2009. – № 2. – С. 29-37
4. Богилло В.И., Борхерс Р., Базилевская М.С. Анализ летучих атмосферных примесей в составе ледника о. Галиндез, станция Вернадский // Укр. Антарк. журнал, 2004, N 2. – С. 82-89.
5. Дмитриев А.А., Белязо В.А. Космос, планетарная климатическая изменчивость и атмосфера полярных регионов. – С. Пб.: Гидрометеиздат, 2006. – 360 с.
6. Дорохов В.М., Зайцев И.Г., Потапова Т.Е., Хаттатов В.У., Юшков В.А. Особенности вертикального распределения озона в Восточной Сибири в зимне-весенние периоды 1994-1996 гг. // Метеорология и гидрология, 1998, № 4. – С. 44-57.
7. Зверев Н.И. Применение статистики в предсказании погоды. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 196 с.
8. Каримова Г.У. Вариации общего содержания озона над Антарктидой. Исследования климата Антарктиды. – Л.: Гидрометеиздат. – 1980. – С. 144-149.
9. Мартазинова В.Ф., Тимофеев В.Е., Иванова Е.К. Атмосферная циркуляция Южной полярной области и климат Антарктического полуострова. – К., 2010. – 92 с.
10. Сидоренков Н.С. Атмосферные процессы и вращение Земли. – С. Пб.: Гидрометеиздат. – 2002. – 386 с.
11. Тимофеев В.Е., Грищенко В.Ф. Зависимость хода содержания атмосферного озона от типа синоптической ситуации в районе украинской антарктической станции // Инф. Бюлл. Украинского антарктич. центра, 1997. – С. 66-67.
12. Титова Е.А., Кароль И.Л., Шаламянский А.М., Клягина Л.П., Соломатникова А.А. Статистический анализ и сравнение эффектов внешних

- факторов, влияющих на поле общего содержания озона над территорией России в 1973-2007 гг. // Метеорология и гидрология, 2009, № 7. – С. 48-64.
13. *Шакина Н.П.* Динамика атмосферных фронтов и циклонов. – М.: Гидрометеоиздат, 1991. – 264 с.
 14. *Julie M. Arblaster, Gerald A. Meehl.* Contributions of External Forcings to Southern Annular Mode Trends // *Journal of Climate*, 2006, Vol. 19, no. 12. – P. 2896-2905
 15. *Anderson, J.G.; W.H. Brune and M.H. Proffitt.* Ozone destruction by chlorine radicals within the Antarctic vortex: The spatial and temporal evolution of ClO-O₃ anti-correlation based on in situ ER-2 data // *J. Geophys. Res.* 1989, Vol. 94. – P. 11465-11479.
 16. *Bloomfield, P, Oehlert G., Thompson M.L., Zeger S.* A frequency domain analysis of trends in Dobson total ozone records // *J. Geophys. Res.*, 1983, Vol. 88. – P. 8512-8522.
 17. *Bojkov, R.D., Zerefos C.S., Balis D.S., Ziomas I.C. and A.F. Bais.* Record low total ozone during northern winters of 1992 and 1993 // *Geophys. Res. Lett.*, 1993, Vol. 20. – P. 1351-1354.
 18. *Bowman, K.P.* Global patterns of the quasi-biennial oscillation in total ozone // *J. Atmos. Sci.* 1989, Vol. 46. – P. 3328-3343.
 19. *Charlton, A. J., A. O'Neill, Lahoz W. A., P. Berrisford, P. a. o.* The splitting of the stratospheric polar vortex in the Southern Hemisphere, September 2002: Dynamical evolution and impacts on ozone // *J. Atmos. Sci.*, 2005, № 62. – P. 590-602.
 20. *Dobson G.M.B. and D.N. Harrison.* Measurements of the amount of ozone in the earth's atmosphere and its relation to other geophysical conditions: Part I. // *Proc. Roy. Soc. London*, 1926. – A110. – P. 660-693.
 21. *Eskes, H., Segers A., and P. van Velthoven:* Ozone forecasts of the stratospheric polar vortex–splitting event in September 2002 // *J. Atmos. Sci.*, 2005, № 62. – P. 812-821.
 22. *Farman J.C.* Recent measurements of total ozone at BAS stations // *U.K. Phil. Trans. R. Soc. London*, 1987, A 323. – P. 629-644.
 23. *Farman J., Gardiner B. and Shanklin J.* Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x / NO_x interaction // *Nature*, 1985, 315 – P. 207-210.
 24. *Hall A., Visbeck M.* Synchronous variability in the Southern Hemisphere atmosphere, sea ice, and ocean resulting from the annular mode // *J. Climate*, 2002, 15. – P. 3043-3057.

25. *Huang H. P., Weickmann K. M. and Hsu C. J.* Trend in atmospheric angular momentum in a transient climate change simulation with greenhouse gas and aerosol forcing // *Journal of Climate*, 2001:14(7). – P. 1525-1534.
26. *Jones A.E., Shanklin J.D.* Continued decline of total ozone over Halley, Antarctica, since 1985 // *Nature*, vol. 376. – P. 409-411.
27. *V.E. Fioletov.* Ozone Climatology, Trends, and Substances that Control Ozone // *Atmosphere-Ocean* 2008, 46 (1). – P. 39-67
28. *Karpetchko A., E. Kyro and B. M. Knudsen.* Arctic and Antarctic polar vortices 1957-2002 as seen from the ERA-40 reanalyses. *J. Geophys. Res.* 2005, № 110: D21109, doi:10.1029/2005JD006113.
29. *Kinnison D. E., K. E. Grant, P. S. Connell, D. A. Rotman and D. J. Wuebbles.* The chemical and radiative effects of the Mount Pinatubo eruption // *J. Geophys. Res.* 1994, Vol. 99, 25. – P. 705-732.
30. *McElroy C.T. and P.F. Fogal.* Ozone: From Discovery to Protection // *Atmosphere-Ocean* 2008, 46 (1). – P. 1-13
31. *McConnell J.C. and J.J. Jin.* Stratospheric ozone chemistry // *Atmosphere-Ocean*, 2008, Vol. 46. – P. 69-92.
32. *Marshall G.J, Battista S., Naik S.S: Thamban M.* Analysis of a regional change in the sign of the SAM-temperature relationship in Antarctica // *Climate Dynamics*, 2011, 36. – P. 277-287.
33. *Martazinova V.F.* The classification of synoptic Patterns by Method of Analogs // *J. Environ. Sci. Eng.*, 2005, Vol. 7. – P. 61-65.
34. *Massom, R. A., Stammerjohn S. E., Smith R. C., M. J. Pook a. o.* Extreme anomalous atmospheric circulation in the West Antarctic Peninsula region in Austral Spring and Summer 2001/02, and its profound impact on sea ice and biota // *Journal of Climate*, 2006, 19(15). – P. 3544-3571.
35. *Meetham, A.R.* The correlation of the amount of ozone with other characteristics of the atmosphere // *Quart. J. R. Met. Soc.* 1937, 63. – P.289-307.
36. *Naujokat B., Roscoe H. K..* Evidence against an Antarctic Stratospheric Vortex Split during the Periods of Pre-IGY Temperature Measurements // *J. of Atm. Sci.* 2005, № 62. – P. 885-889.
37. *Ohring G. and H.S. Muench.* Relationships between ozone and meteorological parameters in the lower stratosphere // *J. Meteorol.* 1959, 17. – P. 195-206.
38. *Previdi M. and B. G. Liepert.* Annular modes and Hadley cell expansion under global warming // *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(22). – P. 132-144.
39. *Randel W. J., Fei Wu.* Cooling of the Arctic and Antarctic Polar Stratospheres due to Ozone Depletion // *Journal of Climate.* 1999, Vol. 12. – P. 1467-1479.

40. *Simmons A. J.; Hortal M., G. Kelly, A. McNally a. o.* ECMWF analyses and forecasts of stratospheric winter polar vortex breakup: September 2002 in the southern hemisphere and related events // *J. Atmos. Sci.* 2005, 62. – P. 668-689.
41. *Solomon, S.* Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and history // *Rev. Geophys.* 1999, 37. – P. 275-316.
42. *Steinbrecht, W., H. Claude, U. Kohler and K. P. Hoinka.* Correlations between tropopause height and total ozone: Implications for long-term changes // *J. Geophys. Res.* – 1998. – Vol. 19. – P. 183-192.
43. *Wenju Cai, Tim Cowan.* Trends in Southern Hemisphere Circulation in IPCC AR4 Models over 1950-99: Ozone Depletion versus Greenhouse Forcing *Journal of Climate* // *J. Climate*, 2007. – Vol. 20, – №4. – P. 681-693.
44. WMO Global Ozone Research and Monitoring Project – Atmospheric ozone. 1985. Report № 15. – 215 p.
45. WMO Report of the international ozone trends panel: Global Ozone Research and Monitoring Project. 1988. Report № 18. – 185 p.
46. Scientific assessment of ozone depletion Global Ozone Research and Monitoring Project – WMO Report № 20 1990. – 192 p.

*Український науково-дослідний
гідрометеорологічний інститут, Київ*

В.Є. Тимофєєв

Роль атмосферної циркуляції у формуванні озонної аномалії в південній півкулі

Вивчено зміни циркуляції атмосфери, на фоні яких сформувалась озонна аномалія в Антарктиці. Проаналізовано інтенсивність циркумполярного вихору, проведено класифікацію форм циркуляції на рівні АТ-100 гПа по окремих десятиліттях, враховано дані зовнішнього кліматоутворювального чинника (кутового моменту обертання атмосфери). Відзначено посилення аномальності циркумполярного вихору (ЦПВ) за останні десятиліття, пов'язані з його термічною неоднорідністю. Показано роль станції „Академік Вернадський” в ідентифікації озонної діри в районі Антарктичного півострова.

Ключові слова: циркумполярний вихор, загальний вміст озону, озонна аномалія, осередок тепла (холоду), індекс циркуляції, найімовірніше поле, кутовий момент обертання атмосфери.

V.E. Tymofeyev

On the role atmospheric circulation in the formation of the ozone anomalies in the southern hemisphere

Changes in the atmospheric circulation, which were responsible for the formation of the anomaly in the total ozone amount in Antarctica are studied. The intensity of the circumpolar vortex have been analyzed, a classification of atmospheric circulation patterns on 100 hPa level is carried out for individual decades, external climate-forming factor (angular momentum of the atmosphere rotation) is examined. A growing anomaly in the circumpolar vortex associated with its thermal contrasts has been identified during the last decades. The role of Academic Vernadsky station in the identification of the ozone hole over the Antarctic Peninsula is shown.

Keywords: circumpolar vortex, total ozone amount, ozone anomaly, pool of warm (cold) air, index of circulation, most probable field, angular momentum of atmosphere rotation.