

С.П. Смышляев, А.И. Погорельцев, Е.А. Дробашевская, А.Ю. Канухина

ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ОЗОНОВЫЕ АНОМАЛИИ В АРКТИКЕ

S.P. Smyshlyaev, A.I. Pogoreltsev, E.A. Drobashetskaya, A.Yu. Kanukhina

DYNAMICAL PROCESSES IMPACT ON THE ARCTIC OZONE DEPLETION

Для исследования причин межгодовой изменчивости весенних озоновых аномалий в Арктике был проведен анализ наземных и спутниковых данных общего содержания озона, температуры, потенциальной завихренности и параметров планетарных волн за период с 1997 по 2013 г.

Ключевые слова: Арктика, озоновые дыры, циркумполярный вихрь, внезапные стратосферные потепления.

An analysis of ground-based and satellite observation has been performed to study the reasons for inter-annual variability of the arctic spring ozone holes. Column ozone, temperature, potential vorticity and planetary waves parameters variability has been tested for the 1997–2013 period.

Key words: Arctic, ozone hole, polar vortex, sudden stratospheric warming.

В 1985 г. специалисты по исследованию атмосферы из Британской Антарктической Службы сообщили о неожиданном факте: весеннее содержание озона в атмосфере над станцией Халли-Бей в Антарктиде уменьшилось за период с 1977 по 1984 г. на 40 % [15]. Вскоре этот вывод подтвердили другие исследователи, показавшие также, что область пониженного содержания озона простирается за пределы Антарктиды и по высоте охватывает слой от 12 до 24 км [8, 11, 12, 13, 16], т.е. значительную часть нижней стратосферы. Полагалось, что озоновая дыра возникла в результате антропогенных воздействий, в том числе широкого использования в промышленности и быту хлорфторуглеродов (ХФУ), разрушающих озоновый слой [15]. Чтобы предотвратить дальнейшее уменьшение общего содержания озона (ОСО) в 1985 г. принята Венская конвенция об охране озонового слоя, в 1987 г. — Монреальский протокол, вступивший в силу 1 января 1989 г. С тех пор протокол подвергался пересмотру семь раз: в 1990 г. (Лондон), 1991 г. (Найроби), 1992 г. (Копенгаген), 1993 г. (Бангкок), 1995 г. (Вена), 1997 г. (Монреаль) и 1999 г. (Пекин). По состоянию на середину 2012 г. 197 государств ратифицировали первоначальную версию Монреальского протокола. Меры по прекращению использования ХФУ в производстве, четкий контроль за

состоянием озонового слоя способствуют постепенному его восстановлению, однако вновь наблюдаемые озоновые аномалии на обоих полюсах говорят о том, что проблема изучена не до конца и существуют другие причины возникновения озоновых дыр как в Антарктике, так и, особенно в последнее время, в Арктике [9, 18, 20]. Образование областей с очень низким содержанием озона в полярных районах несет угрозу для озона средних широт, так как после разрушения циркумполярного вихря (ЦПВ) полярный воздух перемешивается со среднеширотным и, как результат, содержание озона в средних широтах может также уменьшиться. На данный момент существуют множество гипотез, объясняющих появление озоновых дыр, однако все они признают важную роль как динамических, так и химических процессов [15, 20].

Химические гипотезы озоновой дыры основываются на экспериментально обнаруженном факте одновременного с уменьшением ОСО увеличения хлорсодержащих малых газовых составляющих [4, 8, 15, 20]. Вместе с резким уменьшением озона происходит также и охлаждение стратосферы, что может быть вызвано сильным вертикальным подъемом воздушных масс в нижней стратосфере [1, 5, 10]. Крайняя изоляция циркумполярного вихря ведет к охлаждению нижней стратосферы до крайне низких температур, в результате чего достигается состояние, близкое к радиационному равновесию и, следовательно, выхолаживание стремится к нулю [5]. Тогда при возвращении солнца весной возникают большие вертикальные скорости при нагреве стратосферы за счет полярных стратосферных облаков (ПСО), которые накладываются на систему меридиональной циркуляции [9]. Восходящие движения, во-первых, выносят в стратосферу более бедный озоном воздух из нижних слоев, а, во-вторых, способствуют более быстрому разрушению озона на больших высотах, где фотохимические реакции, разрушающие озон, протекают быстрее.

Другой механизм влияния динамических процессов на содержание озона в стратосфере может заключаться в том, что озоновая дыра возникает из-за уменьшения в зимнее время активности планетарных волн при возникновении циркумполярного вихря [6]. Из-за этого уменьшается нисходящее привнесение в полярные районы зимой и весной озона из средних широт, что, в совокупности с разрушением озона в течение длинной полярной ночи внутри циркумполярного вихря, ведет к образованию крайне низких концентраций озона. Кроме того, внезапные стратосферные потепления (ВСП) в значительной степени определяют интенсивность разрушения озона в полярных районах. ВСП, возникающие в результате взаимодействия распространяющихся из тропосферы в стратосферу планетарных волн с зональной циркуляцией [7], могут приводить к замедлению, а в некоторых случаях к изменению направления зонального ветра и увеличению температуры полярной стратосферы иногда на десятки градусов в течение нескольких суток [1]. Как показал еще А.Л. Кац [2], зимние ВСП следует считать нормальным процессом для стратосферы, который выражен тем резче, чем больше температурный контраст между экватором и полюсом. При этом потепления периодически осуществляются, усиливаясь по мере увеличения зимнего градиента температуры в стратосфере. Начиная приблизительно со второй половины декабря спокойный, в общем, режим циркуляции в отдельные годы подвергается исключительно резким изменениям, которые в одних районах в течение непродолжительного периода приводят к повышению температуры на 30–50° и смене западного ветра на

восточный, а в других, наоборот, к столь же значительным похолоданиям и не менее резким изменениям направления ветра.

В циркуляционном смысле в результате наиболее сильных (мажорных, или главных) ВСП стратосферный циркумполярный вихрь может значительно ослабнуть или произойти раздвоение центра ЦПВ с последующим существованием в течение более или менее длительного периода двух самостоятельных циклонических центров вместо одного [19]. Повторяемость и продолжительность существования двух центров в системе деформировавшегося полярного стратосферного циклона могут быть различными в разные годы. В одни годы раздвоение полярного стратосферного циклона происходит чаще, в другие — реже. Раздвоение стратосферного полярного вихря сопровождается изменениями поля температуры. При этом нередко происходит повышение температуры в средней стратосфере. В слое 20–30 км иногда температура достигает 250–260 К и даже 270 К, вместо обычных для зимы 200–210 К [14].

Значительный рост температуры в ходе ВСП приводит к уменьшению поверхности полярных стратосферных облаков [7], соответственно, снижается потенциал для весеннего разрушения озонового слоя в стратосфере. Например, в результате мажорного ВСП в январе 2010 г. деструкция озонового слоя в целом за весь зимний сезон была одной из самых минимальных за последние годы [3]. Как показывают результаты наблюдений, в Арктике мажорные ВСП происходят примерно 6–7 раз за 10 лет, хотя, например, с 1992 по 1998 г. в силу неизвестных причин мажорных ВСП не наблюдалось. В отличие от Арктики в Антарктике мажорное ВСП было зафиксировано только один раз за последние годы наблюдений. Причины межгодовой изменчивости состояния полярной стратосферы, оказывающей сильное влияние на озоновый слой, по-прежнему остаются неизвестными.

В настоящей работе на основании исследования результатов ре-анализа метеорологических характеристик UKMO, ECMWF и измерений характеристик газового состава MLS AURA была проанализирована эволюция циркумполярного вихря в зимне-весенний период над Арктикой в 2010–2011 гг., когда наблюдалась озоновая аномалия, и было произведено сравнение с эволюцией циркумполярного вихря и распределения малых газовых составляющих в зимне-весенний период над Арктикой в 2009–2010 гг., когда глобальные факторы, влияющие на состав атмосферы были схожи, а динамическая ситуация менялась.

На рис. 1 представлена изменчивость температуры на высоте 70 гПа, а также обозначена изменчивость границ циркумполярного вихря (сплошная коричневая линия) по значению потенциальной завихренности $5 \times 10^{-5} \text{ км}^2 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-1}$ на изоэнтропической поверхности 530 К. Как видно из рисунка, внутри ЦПВ температура остается низкой, ввиду того, что он изолирует обмен воздухом и массой с окружающим воздухом средних широт. В январе-феврале практически каждый год происходят внезапные стратосферные потепления, которые нарушают динамический баланс и разрушают циркумполярный вихрь. После стратосферного потепления разрушения вихрь может восстановиться и, как следствие, температура снова понизится, как было в 2011 г., а может и не восстановиться, и температура существенно не понижается, как это произошло в 2010 г. События ВСП могут развиваться за счет двух причин: усиления волновой активности в нижней атмосфере, которое сопровождается ростом потока волновой

активности из тропосферы в стратосферу (так называемый, классический сценарий) и/или из-за внутренних динамических процессов, т.е. взаимодействия волн со средним потоком на высотах стратосферы.

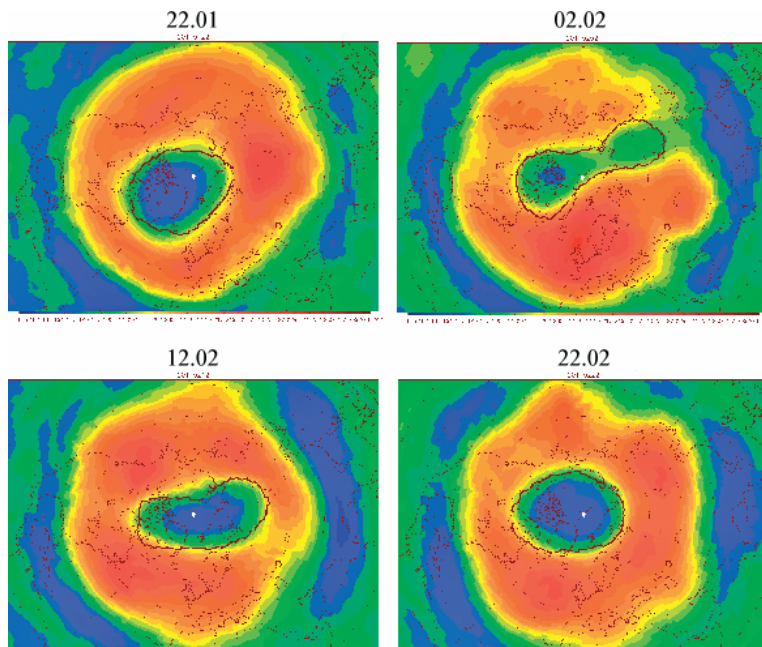


Рис. 1. Распределение температуры и границы ЦПВ в Северном полушарии в различные дни в 2011 г. по данным анализа ECMWF

Для анализа межгодовой и внутрисезонной изменчивости факторов, определяющих образование и устойчивость циркумполярного вихря, на рис. 2 приведено высотно-временное распределение амплитуды планетарной волны с волновым числом 1 на границе Арктики и Субарктики, скорости зонального ветра, а также температуры атмосферы вблизи Северного полюса. Сравнение верхних рисунков показывает, что в начале зимы, с декабря по январь динамическая ситуация развивается похожим образом для 2009–2010 и 2010–2011 гг. При этом зимой 2009–2010 гг. в нижней стратосфере (ниже 30 км) активность планетарных волн даже ниже, чем зимой 2010–2011 гг., что выражается в меньших амплитудах (верхний рисунок) и более низкой температуре (нижний рисунок). Скорость зонального ветра (средний рисунок) в начале и середине зимы устойчива для обоих периодов. В результате этого условия для изоляции зоны внутри циркумполярного вихря и формирования полярных стратосферных облаков формируются в начале зимы обоих исследуемых периодов.

В середине января и в 2010 и в 2011 г. происходило внезапное стратосферное потепление, что выражается в нарушении устойчивости зонального ветра (средний рисунок), в результате чего возникают потоки в поперечном направлении, т.е. начинается

обмен воздухом между средними и полярными широтами. Однако в 2011 г. влияние внезапного стратосферного потепления ощущается на высотах средней стратосферы, а в нижней стратосфере зональный ветер сохраняется. Это происходит из-за того, что активность планетарных волн в нижней стратосфере в 2011 г. ниже, чем в 2010 г., что выражается в более низких значениях амплитуды волны (верхний рисунок) в 2011 г. по сравнению с 2010 г.

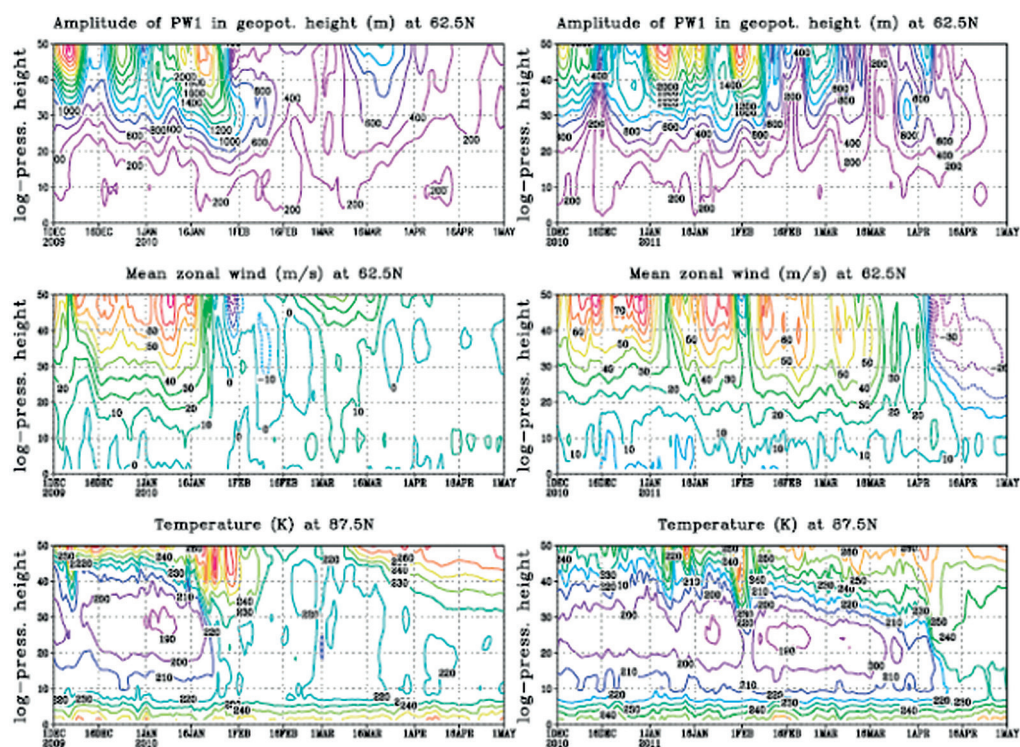


Рис. 2. Распределение характеристик, определяющих формирование арктического циркумполярного вихря зимой-весной 2009–2010 и 2010–2011 гг. по данным UKMO анализа

В результате в 2010 г. циркумполярный вихрь после внезапного стратосферного потепления из-за высокой активности планетарных волн (верхний рисунок) окончательно разрушается, скорость зонального ветра (средний рисунок) остается низкой, обмен воздухом между средними и полярными широтами сохраняется, а температура воздуха нижней стратосферы (нижний рисунок) сохраняется высокой. В результате этого образовавшиеся в первой половине зимы полярные стратосферные облака разрушились после ВСП, хлорная активация была слабой и разрушения озона не произошло.

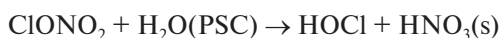
В 2011 г. из-за низкой активности планетарных волн (верхний рисунок) зональный ветер (средний рисунок) продолжал оставаться устойчивым, препятствуя обмену воздухом и массой между полярными и средними широтами. В результате этого температура

нижней стратосферы (нижний рисунок) продолжала опускаться, сохраняя условия для увеличения площади поверхности полярных стратосферных облаков с последующей хлорной активацией и разрушением озона после возвращения солнца весной.

Таким образом, можно предположить, что устойчивость циркумполярного вихря является ключевым параметром, определяющим понижение температуры полярной стратосферы, образование полярных стратосферных облаков и галогенную активацию на поверхности ПСО, а среди процессов, определяющих формирование, эволюцию и разрушение циркумполярного вихря ключевым является активность планетарных волн на границе Арктики и Субарктики.

Низкая планетарная активность на границе Арктики и Субарктики способствует формированию полярных стратосферных облаков первого и второго типа, физические и химические процессы на поверхности которых влияют на содержание малых газовых составляющих в атмосфере Арктики и Субарктики. Для азотосодержащих газов полярной стратосферы доминирующим газом является пар азотной кислоты, определяющим и содержание двуокси азота. Поэтому в настоящем исследовании изучалось и влияние полярных стратосферных облаков на пары азотной кислоты.

В течение зимы 2009–2010 гг., как видно из рис. 2, циркумполярный вихрь существовал только до внезапного стратосферного потепления, поэтому полярные стратосферные облака не сохранились до конца зимы, в результате чего, как видно из рис. 3, содержание паров азотной кислоты остается высоким, оксида хлора — достаточно низким, а озона высоким. При этом, даже в области низких температур (левый верхний рисунок) мгновенной реакции озона и других газов не происходит, так как процессы на поверхности полярных стратосферных облаков имеют инерционный характер и могут сказаться на содержании малых газов только после продолжающейся в течение продолжительного времени (не менее нескольких недель) хлорной активации, в результате которой хлорные компоненты переходят в оптически активную форму:



В результате этих гетерогенных реакций на поверхности полярных стратосферных облаков образуются компоненты Cl_2 и HOCl , которые способны распадаться при поглощении даже малых потоков солнечной радиации, которая появляется после возвращения Солнца по окончании полярной ночи. В 2010 г. указанные выше процессы гетерогенной хлорной активации происходят только до внезапного стратосферного потепления, а после него Cl_2 и HOCl размещаются воздушными потоками, так как циркумполярный вихрь разрушается. В результате этого сильной хлорной активации не происходит, а образующиеся хлорные компоненты нейтрализуются азотными составляющими из-за высокого уровня паров азотной кислоты (правый верхний рис. 3).

Зимой и весной 2011 г. в Арктике впервые наблюдалось очень существенное уменьшение ОСО — до значений менее 200 ед. Добсона. В начале апреля Всемирная

метеорологическая организация объявила, что количество озона в атмосфере Арктического региона этой зимой сократилось на рекордную величину — 40 %. До этого по наблюдениям на сети арктических озонометрических станций выраженные локальные минимумы общего содержания озона в Арктике в 1996, 2000 и 2005 г. не превышали 30 %. В марте 2011 г. впервые уменьшение общего содержания озона в Арктике не только превысило 40 %, но и распространилось на большую часть Северной Полярной области.

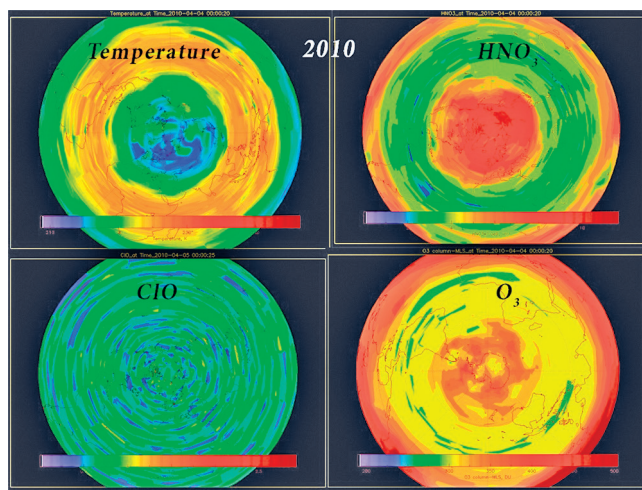


Рис. 3. Характеристики нижней стратосферы (70 гПа) Арктики и Субарктики в начале весны 2010 г. по данным измерений MLS AURA

Как было показано выше (рис. 2) в результате низкой волновой активности в 2011 г. длительно и устойчиво существовал арктический циркумполярный вихрь. В результате этого до конца зимы и начала весны в нижней стратосфере существовала область низких температур (рис. 4), происходило формирование полярных стратосферных облаков, гетерогенная активация на которых привела к повышенному содержанию хлорных газов в начале весны, как видно из рис. 4. При этом нейтрализация хлорных газов в результате химического взаимодействия с азотными составляющими не происходила, так как содержание азотных газов также сократилось (верхний правый рис. 4).

Процесс уменьшения содержания азотных составляющих, называемый денитрификацией полярной стратосферы, происходит в результате гравитационного осаждения частиц полярных стратосферных облаков, состоящих из воды, серной и азотной кислот. Как видно из приведенных выше формул гетерогенной активации, образующаяся в них азотная кислота остается в твердой фазе (обозначена знаком s). В результате длительно существующих холодных условий и поглощения паров азотной кислоты размер частиц ПСО сильно увеличивается, и они становятся подверженными быстрому гравитационному осаждению. Таким образом, азотные составляющие выпадают на землю или остаются в тропосфере, а в полярной стратосфере происходит денитрификация.

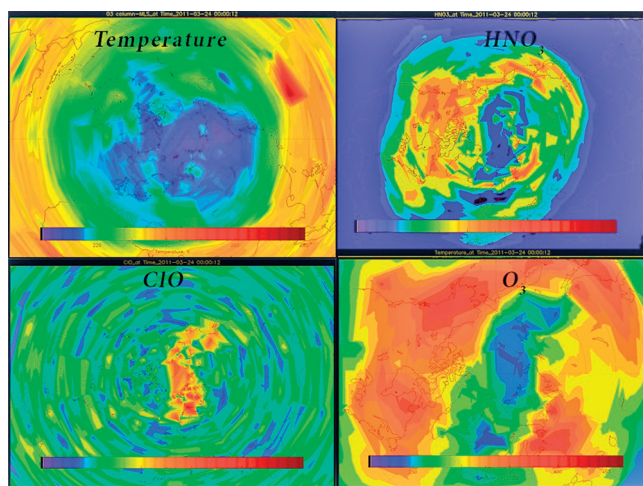


Рис. 4. Характеристики нижней стратосферы (70 гПа) Арктики и Субарктики в начале весны 2011 г. по данным измерений MLS AURA

На нижнем правом рис. 4 видно сильное сокращение озона именно в той области, где происходит денитрификация, что подтверждает ее ключевую роль. Более того, проведенное исследование чувствительности содержания малых газовых составляющих к процессам формирования полярных стратосферных облаков показало, что именно наличие или отсутствие денитрификации определяет глубину озоновых аномалий. В условиях существования только полярных стратосферных облаков первого типа, которые способствуют хлорной активации, но не подвержены гравитационному осаждению из-за своих малых размеров, существенного разрушения озона не происходит, так как содержание азотных газов остается высоким и они быстро нейтрализуют высвобождающиеся хлорные радикалы. Это подтверждает, что для сильного разрушения озона недостаточно только хлорной активации на поверхности полярных стратосферных облаков, но и необходимо низкое содержание азотных малых газовых примесей.

Причиной аномального уменьшения общего содержания озона является то обстоятельство, что зимой 2011 г. циркумполярный вихрь в Арктике был необычно устойчив. Обычно период с низкими температурами в стратосфере длится 2–2,5 месяца. В эту зиму он продолжался четыре месяца — до апреля, хотя обычно заканчивается в марте. По данным спутниковых и станционных наблюдений было отмечено, что температуры ниже критического для реакций разрушения озона порога -78°C в арктической стратосфере, на высотах от 15 до 23 км сохранялись более 100 дней. При этом падение общего содержания озона ниже уровня в 250 единиц Добсона наблюдалось в течение 27 дней, а ниже 230 — в течение недели. В этом отношении сокращение количества озона в Арктике впервые достигла уровня, при котором можно говорить об арктической озоновой дыре. Область, ограниченная циркумполярным вихрем, в Арктике значительно меньше, чем в Антарктиде, но она более мобильна.

Приведенные на рис. 5 результаты анализа содержания малых газов атмосферы для зимы-весны 2013 г. подтверждают важную роль денитрификации: несмотря на достаточно низкие температуры и повышенное содержание хлорных газов в отдельных местах, содержание озона существенно не уменьшается, так как денитрификации не происходит.

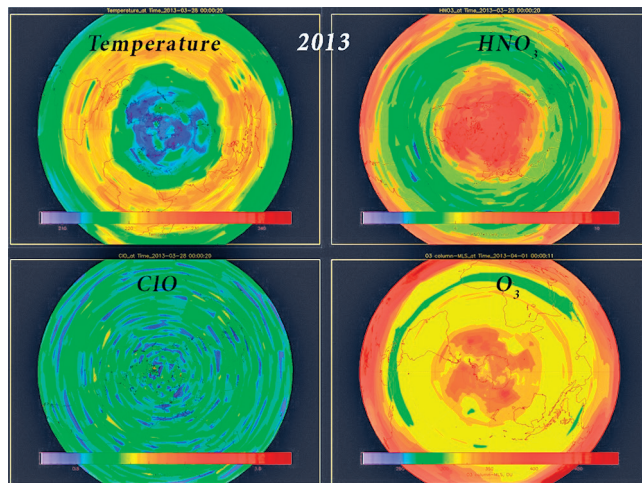


Рис. 5. Характеристики нижней стратосферы (70 гПа) Арктики и Субарктики в начале весны 2013 г. по данным MLS AURA

Осуществлен анализ результатов наблюдений с целью определения степени влияния волновых процессов на стратосферную циркуляцию, циркумполярный вихрь, процессы формирования и эволюции полярных стратосферных облаков, формирование озоновых полярных аномалий и их влияния на мезосферу. Интенсивность волновой активности определялась по данным наблюдений United Kingdom Meteorological Office (UKMO), границы потенциального вихря и температура нижней стратосферы и мезосферы определялись по данным ре-анализа the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), изменчивость содержания озона изучалась по данным World Ozone and Ultraviolet Radiation Data center (WOUDC) и National Aeronautics And Space Administrations (NASA), а также данных ретроспективного анализа Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications (MERRA).

Таким образом, произведен анализ новых результатов об относительной роли физических процессов формирования, эволюции и разрушения циркумполярного вихря в арктической стратосфере, процессов понижения температуры нижней стратосферы и образования полярных стратосферных облаков, гравитационного осаждения частиц ПСО, приводящих к денитрификации и дегидрации полярной стратосферы, а также химических процессов галогенной активации на поверхности ПСО и сульфатного аэрозоля и разрушения озона в условиях распада продуктов гетерогенных химических реакций на поверхности ПСО после возвращения солнца. Показано, что процессы галогенной активации на поверхности частиц полярных стратосферных облаков

определяют каталитическое разрушение озона после возвращения солнца полярной весной, однако ключевым фактором, влияющим на интенсивность разрушения озона и формирование озоновых дыр, является денитрификация полярной стратосферы, препятствующая связыванию хлорных и бромных радикалов.

На рис. 6 и 7 представлены результаты анализа для зимы 2012–2013 гг. Из рисунков видно, что в первой половине января 2013 г. наблюдалось событие ВСП, которое сопровождалось резким ослаблением СПВ1, устойчивым полярным вихрем и относительно низкими температурами в полярной стратосфере.

На рис. 8 приведено распределение температуры и озона в Арктике на высоте 28 км по результатам наблюдений MERRA для зимы 2012–2013 гг. Анализ результатов показывает, что изменения температуры и озона хорошо согласуются на этих высотах. При этом сокращение озона не может вызываться химическими факторами, так как в течение полярной ночи химические процессы протекают медленно, к тому же гетерогенная активация еще не успевает к началу и середине зимы привести к перераспределению хлорных и бромных газов. Кроме того, эти измерения показаны для высот, где полярные стратосферные облака образуются редко. Таким образом, эти результаты также подчеркивают важность динамических факторов, в частности, волновой активности, которая изолирует нижнюю стратосферу от обмена воздухом и теплом и приводит к дивергенции температуры и содержания озона.

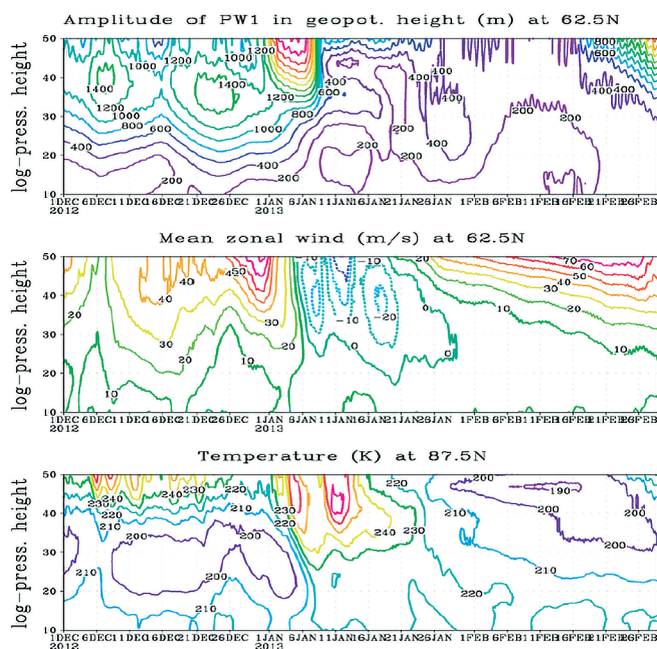


Рис. 6. Полученные на основании анализа данных MERRA высотно-временные сечения амплитуды зональной гармоники с $m = 1$ в поле геопотенциальной высоты и среднего зонального ветра на $62,5^\circ$ с.ш. (верхний и средний рисунки соответственно)

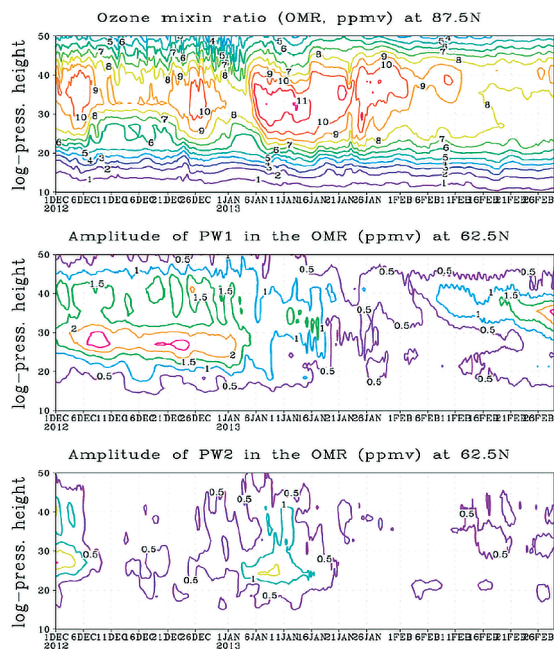


Рис. 7. Полученные на основании анализа данных MERRA высотно-временные сечения относительной концентрации озона в полярной области (верхний рисунок) и изменение амплитуд планетарных волн с зональными волновыми числами $m = 1$ и 2 в поле относительной концентрации озона на $62,5^\circ$ с.ш. (средний и нижний рисунки, соответственно).

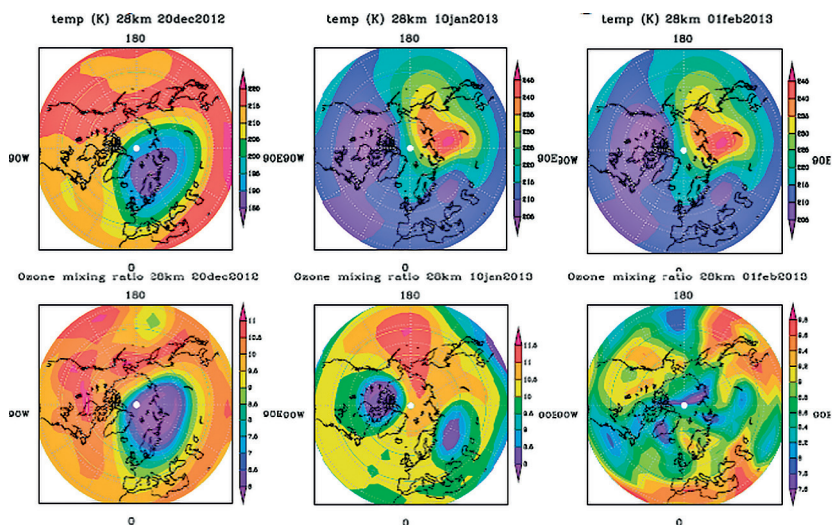


Рис. 8. Изменение общего содержания озона по данным MERRA в 2013 г.

Заключение

На основе анализа результатов спутниковых наблюдений исследовалось влияние планетарных волн на формирование озоновых дыр в Арктике. Сопоставление результатов измерений общего содержания озона, потенциальной завихренности, температуры стратосферы, а также амплитуд планетарных волн, скорости зонального ветра показало, что внезапные стратосферные потепления способствуют разрушению циркумполярного вихря и препятствуют гетерогенной активации хлорных газов на полярных стратосферных облаках, ведущей к разрушению озона после окончания полярной ночи. Межгодовая изменчивость глубины озоновых дыр, площади области, охваченной озоновой аномалией, и продолжительности существования озоновых дыр в Арктике определяется величиной волновой активности в нижней стратосфере после внезапных стратосферных потеплений. В годы со слабой волновой активностью циркумполярный вихрь может восстановиться, что ведет к возобновлению процессов, ведущих к интенсивному разрушению озона после возвращения Солнца, а в годы с сильной волновой активностью — циркумполярный вихрь не восстанавливается и озоновые дыры не формируются.

Сравнение результатов анализа наблюдений и численного моделирования показало, что теоретические представления о влиянии волновых возмущений на стабильность циркумполярного вихря и формирование озоновых аномалий подтверждаются наблюдениями характеристик атмосферных волн, границ циркумполярного вихря, изменчивости температуры нижней стратосферы и степени разрушения озона. Однако, как показали результаты наблюдений, в северном полушарии, в отличие от южного полушария, зоны пониженных концентраций озона могут образовываться в результате влияния динамических факторов, таких как волновая активность и устойчивость циркумполярного вихря. При этом они часто формируются еще в течение полярной ночи, когда действие химических факторов ослаблено отсутствием солнечной радиации.

Результаты исследования показали, что максимальные озоновые аномалии наблюдаются в годы слабой волновой активности после внезапных стратосферных потеплений, которая способствует формированию стабильного и длительно сохраняющегося циркумполярного вихря и низких температур в зимней стратосфере.

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ. Анализ результатов наблюдений, демонстрирующих влияние волновой активности на состав и структуру атмосферы, проводилось при поддержке Российского Научного Фонда (проект 14-17-00685), а исследование влияния формирования полярных стратосферных облаков и влияние на них динамических факторов осуществлялось в рамках проекта 14-17-00096 Российского Научного Фонда. Учет влияния изменчивости солнечной радиации на состав атмосферы проводился при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 14-05-00871-а).

Литература

1. Гаврилов Н.М., Коваль А.В., Погорельцев А.И., Савенкова Е.Н. Численное моделирование влияния стационарных мезомасштабных орографических волн на меридиональную циркуляцию и потоки озона в средней атмосфере. // Геомагнетизм и аэрономия, 2014, т. 54, № 3, с. 412–419.

2. Кац А.Л. Циркуляция в стратосфере и мезосфере. — Л.: Гидрометеиздат, 1968. — 563 с.
3. Погорельцев А.И., Савенкова Е.Н., Перцев Н.Н. Внезапные стратосферные потепления: роль нормальных атмосферных мод. // Геомагнетизм и аэронавигация, 2014, т. 54, № 3, с. 387–403.
4. Смышляев С.П., Галин В.Я., Шаарийбуу Г., Моцаков М.А. Моделирование изменчивости газовых и аэрозольных составляющих в стратосфере полярных районов. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2010, т. 46, № 3, с. 291–306.
5. Смышляев С.П., Кароль И.Л., Зубов В.А., Юдин В.А., Геллер М.А. Двумерное моделирование сезонно-широтной изменчивости общего содержания атмосферного озона с использованием параметров крупномасштабного переноса из модели общей циркуляции атмосферы. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2002, т. 38, № 1, с. 81–94.
6. Смышляев С.П., Погорельцев А.И., Галин В.Я., Дробашевская Е.А. Влияние волновой активности на газовый состав стратосферы полярных районов. // Геомагнетизм и аэронавигация, 2015, т. 55, № 6, с. 1–15.
7. Терещенко В.А., Терещенко В.Д., Черняков С.М. Зимние полярные стратосферные облака в полярных широтах. // Вестник МГТУ, 2010, № 13, с. 1052–1059.
8. Chehade W., Weber M., Burrows J.P. Total ozone trends and variability during 1979–2012 from merged data sets of various satellites. // Atmos. Chem. Phys., 2014, vol. 14, pp. 7059–7074.
9. Chipperfield M.P., Jones R.L. Relative influences of atmospheric chemistry and transport on Arctic ozone trends. // Nature, 1999, vol. 400, pp. 551–554.
10. de Zafta R., Smyshlyayev S. On the formation of HNO₃ in the Antarctic mid-to-upper stratosphere in winter. // J. Geophys. Res., 2001, vol. 106, pp. 23115–23125.
11. Hamil P., Toon O.B. Polar stratospheric clouds and the ozone hole. // Physics today, 1991, vol. 44, № 12, pp. 34–42.
12. Huck P.E., McDonald A.J., Bodeker G.E., Struthers H. Interannual variability in Antarctic ozone depletion controlled by planetary waves and polar temperature. // Geophys. Res. Lett., 2005, vol. 32. — DOI:10.1029/2005GL022943.
13. Randel W.J., Wu F., Stolarski R. Changes in column ozone correlated with the stratospheric EP flux. // J. Met. Soc. Jap., 2002, vol. 80, pp. 849–862.
14. Schoeberl M.R., Hartmann D.L. The dynamics of the stratospheric polar vortex and its relation to springtime ozone depletions. // Science, 1991, vol. 251, pp. 46–52.
15. Solomon S. Stratospheric ozone depletion. A review of concepts and history. // Rev. Geophys., 1999, vol. 37, pp. 275–316.
16. Solomon S., Garcia R.R., Rowland F.S., Wuebbles D.J. On the depletion of Antarctic ozone. // Nature, 1986, vol. 321, pp. 755–758.
17. Stolarski R.S., Frith S.M. Search for evidence of trend slow-down in the long-term TOMS/SBUV total ozone data record: the importance of instrument drift uncertainty. // Atmos. Chem. Phys., 2006, vol. 6, pp. 4057–4065. — DOI:10.5194/acp-6-4057-2006.
18. Strahan S.E., Douglass A.R., Newman P.A. The contributions of chemistry and transport to low arctic ozone in March 2011 derived from Aura MLS observations. // J. Geophys. Res. Atmos., 2013, vol. 118, pp. 1563–1576. — DOI:10.1002/jgrd.50181.
19. Vargin P. Stratospheric Polar Vortex Splitting in December 2009. // Atmosphere-Ocean, 2015, vol. 53, iss. 1. — DOI:10.1080/07055900.2013.851066.
20. World Meteorological Organization (WMO), Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014, World Meteorological Organization, Global Ozone Research and Monitoring Project-Report no. 55. — Geneva, Switzerland, 2014. — 416 p.