



Состояние озонового слоя в Арктике

Бюллетень 2007 — 2008

Центральная аэрологическая обсерватория
Росгидромет
<http://www.cao-rhms.ru>

Введение

Исследования эволюции озонового слоя под воздействием естественных и антропогенных факторов является важной задачей в изучении климата. Истощение защитного озонового слоя Земли, вызванное антропогенными факторами, наиболее заметно проявляется в Арктике и Антарктике внутри полярного циклона в зимне-весенний период. Этот процесс имеет большое значение для состояния окружающей среды, так как вызывает заметное увеличение уровня ультрафиолетовой радиации, что в свою очередь может иметь губительные последствия для здоровья человека и состояния экосистемы в целом. В отличие от антарктического, арктический полярный циклон в течение зимы часто смещается от полюса в область густонаселенных средних широт. К концу зимне-весеннего периода, когда величина химических потерь озона (ХПО) внутри полярного стратосферного циклона достигает максимальных значений, циклон, как правило, располагается над территорией Европейской части РФ и Сибири. На рис. 1 показано типичное географическое положение полярного циклона в марте.

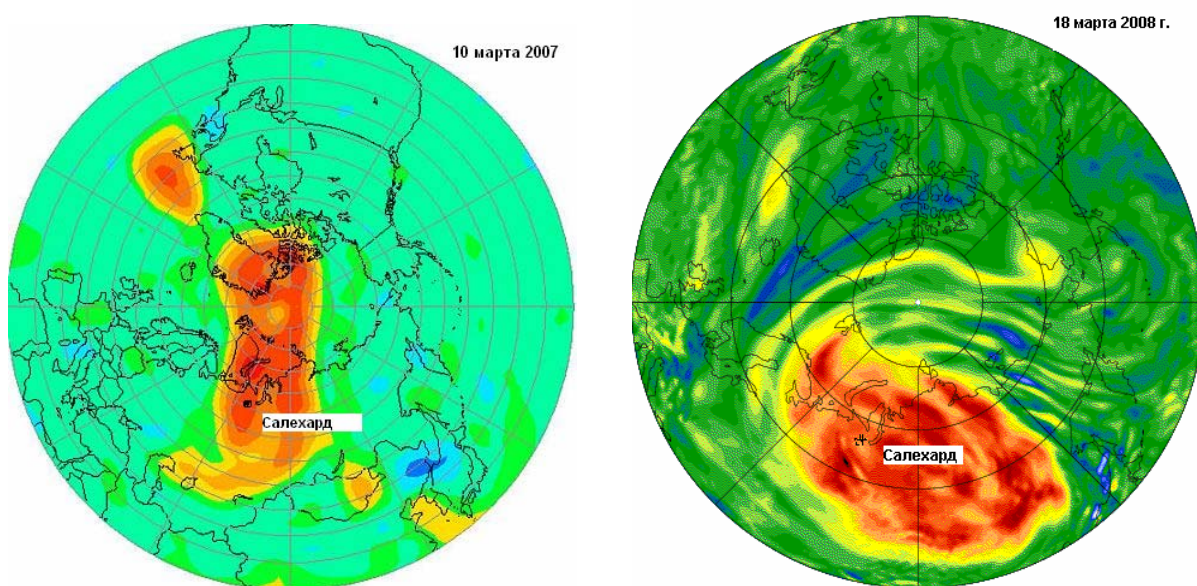


Рис. 1. Типичное географическое положение полярного стратосферного циклона весной 2007 и 2008 года в период максимального разрушения озона.

В условиях, когда содержание озоноразрушающих компонент в стратосфере продолжает оставаться высоким, межгодовая изменчивость ХПО в большой степени определяется температурным режимом стратосферы. До настоящего времени сохраняется тенденция сильного охлаждения полярной стратосферы и увеличения объема полярных стратосферных облаков (ПСО) в отдельные зимы. Увеличение концентрации парниковых газов может привести к дальнейшей эскалации этого процесса.

В 2007 и 2008 году Центральная аэрологическая обсерватория (Росгидромет) продолжала осуществлять мониторинг состояния озонового слоя в высоких широтах северного полушария в зимне-весенний период. Для геофизического анализа и оценок химических потерь озона (ХПО) использовались данные спутниковых наблюдений и результаты баллонного зондирования в Арктике.

Метеорология полярного циклона

Для Арктики характерна большая межгодовая изменчивость динамических характеристик полярного циклона (силы, стабильности, длительности, а также температурного режима) и, как следствие, степени химического разрушения озона. В целом, две последние зимы

относятся к типу холодных зим с сильным стабильным полярным циклоном и низкими стратосферными температурами, создающими благоприятные условия для значительного химического разрушения озона. На рис.2 показано изменение силы полярного циклона в терминах средней потенциальной завихренности на изэнтропическом уровне 475 К в течение зимне-весеннего периода для двух последних лет в сравнении с параметрами слабого и неустойчивого зимнего циклона 2006 года.

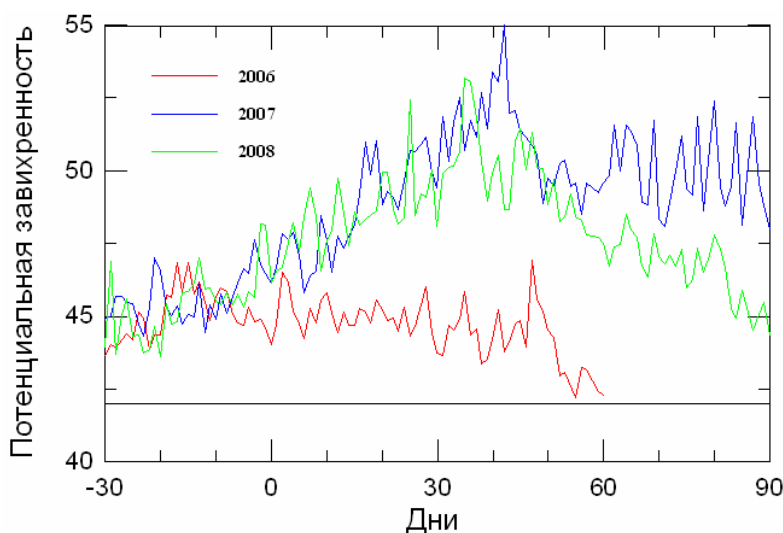


Рис. 2. Средняя потенциальная завихренность (ПЗ) в полярном циклоне на изэнтропическом уровне 475 К. Данные получены путем осреднения всех значений ПЗ > 42 ед. ПЗ ($10^6 \text{ км}^2 / \text{кгс}$) в узлах регулярной сетки.

Зимой 2006/07 года стабильный изолированный полярный циклон сформировался к середине ноября 2006 года и в течение декабря и первой половины января располагался над полюсом. В середине января циклон начал смещаться в сторону Европы и в течение февраля и марта часто располагался над Европой и Сибирью в хорошо освещенной области. 5 февраля в результате возросшей активности планетарных волн циклон разделился на две части (на что указывает уменьшение величины ПЗ в это время), но уже 9 февраля вновь воссоединился. Мажорное стратосферное потепление в самом конце февраля привело к отрыву филаментов от внешней границы циклона, однако центральная его часть сохранялась до середины апреля.

Зимой 2007/08 года полярный циклон сформировался в начале декабря 2007 года и располагался над полюсом до середины января 2008 года.

В конце февраля динамическое возмущение циклона в результате мажорного стратосферного потепления вызвало сильную филаментацию его внешней границы с отрывом отдельных фрагментов, однако не привело к разделению циклона. В начале марта площадь циклона заметно сократилась, но его финальное разрушение произошло достаточно поздно – в конце апреля.

Температура и полярные стратосферные облака

Вертикальное распределение минимальных температур в течение зимне-весеннего периода для двух зим приведено на рис. 3. На рис. 5 показано изменение площади образования полярных стратосферных облаков на изэнтропическом уровне 475К для разных лет. Зимой 2006/07 года температуры ниже пороговых значений для образования ПСО I типа наблюдались непрерывно с декабря 2006 до конца февраля 2007 года в широком диапазоне потенциальной температуры 450-650 К. Область низких температур существенно уменьшилась из-за сильного потепления, наблюдавшегося в конце декабря (рис. 5), но уже в начале января стратосфера вновь охладилась. Серия минорных потеплений в течение февраля не вызвала существенного повышения температуры. В январе и феврале область очень низких температур нередко опускалась ниже

изоэнтропического уровня 400 К. В отдельные периоды в течение декабря и января температура в стратосфере опускалась ниже пороговых значений для образования ПСО II типа – ледяных частиц (рис. 4). В начале марта температура в стратосфере резко поднялась в результате мажорного стратосферного потепления и уже не опускалась до пороговых для образования полярных стратосферных облаков значений до конца сезона, за исключением очень короткого периода в середине марта.

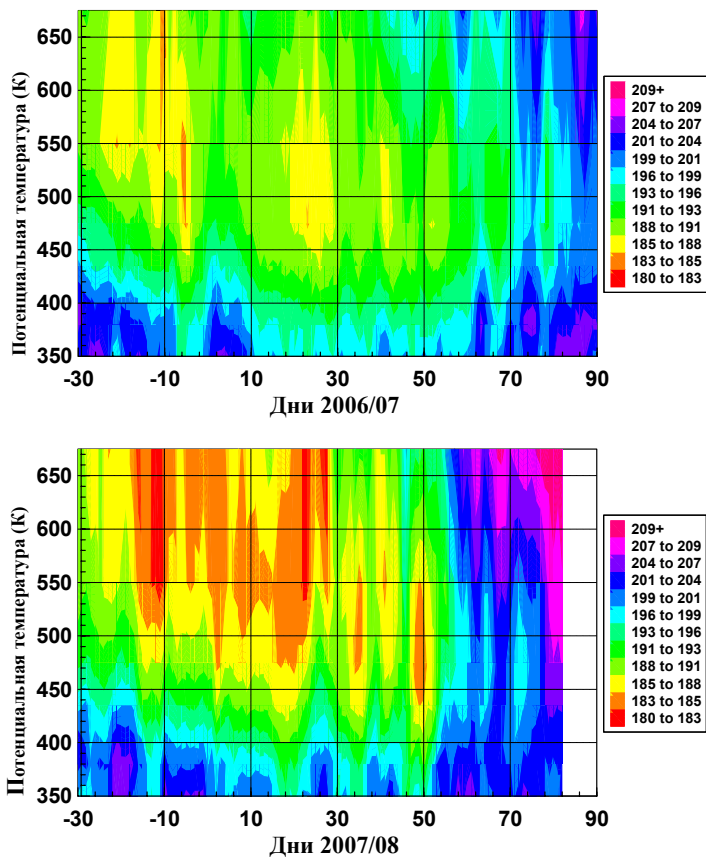


Рис. 3. Вертикальное распределение минимальных температур в полярном циклоне в течение зимне-весеннего периода

благодаря чему ПСО над Европой можно было наблюдать визуально. Объем области, занимаемой полярными стратосферными облаками в течение зимне-весеннего периода, достигал в 2008 г. значения 38.4 млн км² и к настоящему времени занимает 4-е место по величине за время наблюдений в Арктике.

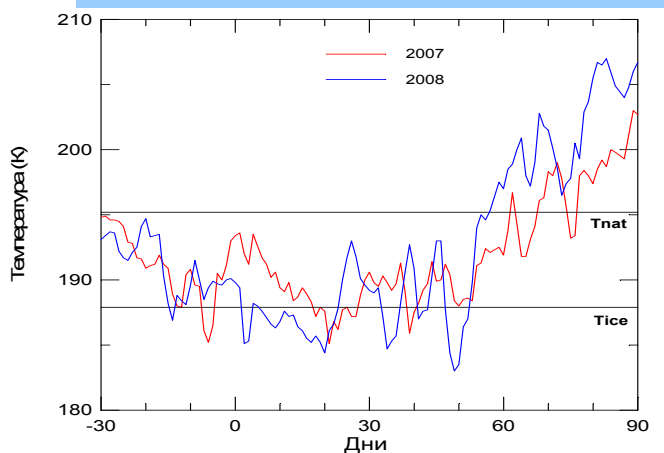


Рис. 4. Изменение ежедневной минимальной температуры в полярном циклоне на изэнтропическом уровне 475 К (~18-19 км). Черными прямыми обозначены пороговые для образования ПСО I и II типа значения температуры.

Зима 2007/08 года была холоднее предыдущей. В декабре температура на изэнтропических уровнях 650-675 К опускалась до рекордно низких за последние 50 лет значений. Как и предыдущей зимой, температуры ниже пороговых значений для образования ПСО I типа наблюдались непрерывно с декабря 2007 до середины февраля 2008 года на всех высотах в нижней стратосфере, а в течение всего января наблюдались условия для образования ПСО II типа. В декабре и январе область образования ПСО распространялась до необычно высокого уровня 675 К (~30 км). Серия минорных потеплений, наблюдавшихся в верхней стратосфере с середины января, вызвала незначительное повышение температуры в нижней стратосфере (рис. 4). Период образования ПСО закончился в конце февраля – несколько раньше, чем в предыдущем году – вследствие мажорного потепления. Сильная динамическая активность за несколько дней до начала мажорного потепления привела к резкому снижению температуры в нижней стратосфере,

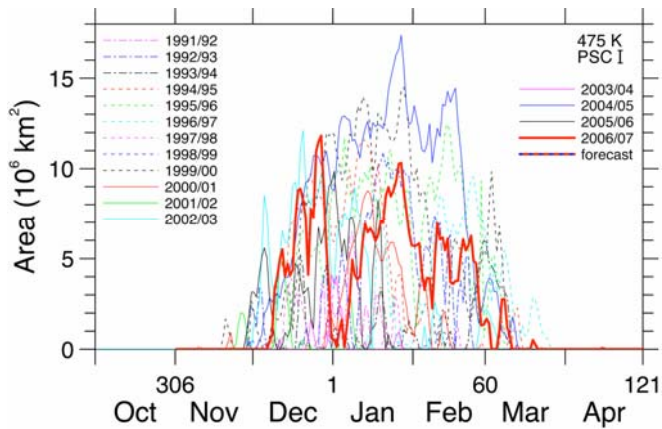


Рис. 5. Площадь возможного образования полярных стратосферных облаков на изобарическом уровне 475К для разных лет

Эволюция общего содержания озона

Изменение общего содержания озона (ОСО) в арктических широтах в течение зимне-весеннего периода является результатом совокупного действия динамических и химических процессов. На рис. 6 приведены среднемесячные отклонения ОСО от многолетних средних значений с января по март для зимы 2006/07 (верхний ряд) и 2007/08 года (нижний ряд). Зимой 2006/07 года очень низкие значения ОСО наблюдались в январе над Арктикой. В феврале дефицит озона до 25% по сравнению с многолетними средними значениями зафиксирован над Аляской. В конце марта область низких значений ОСО (на 20 – 25% ниже климатической нормы) располагалась над центральной Сибирью. В целом, дефицит озона в высоких широтах северного полушария зимой 2007/08 года превышал наблюдавшиеся предыдущей зимой значения как по величине, так и по географической протяженности. В январе 2008 дефицит ОСО до 15-25% наблюдался над

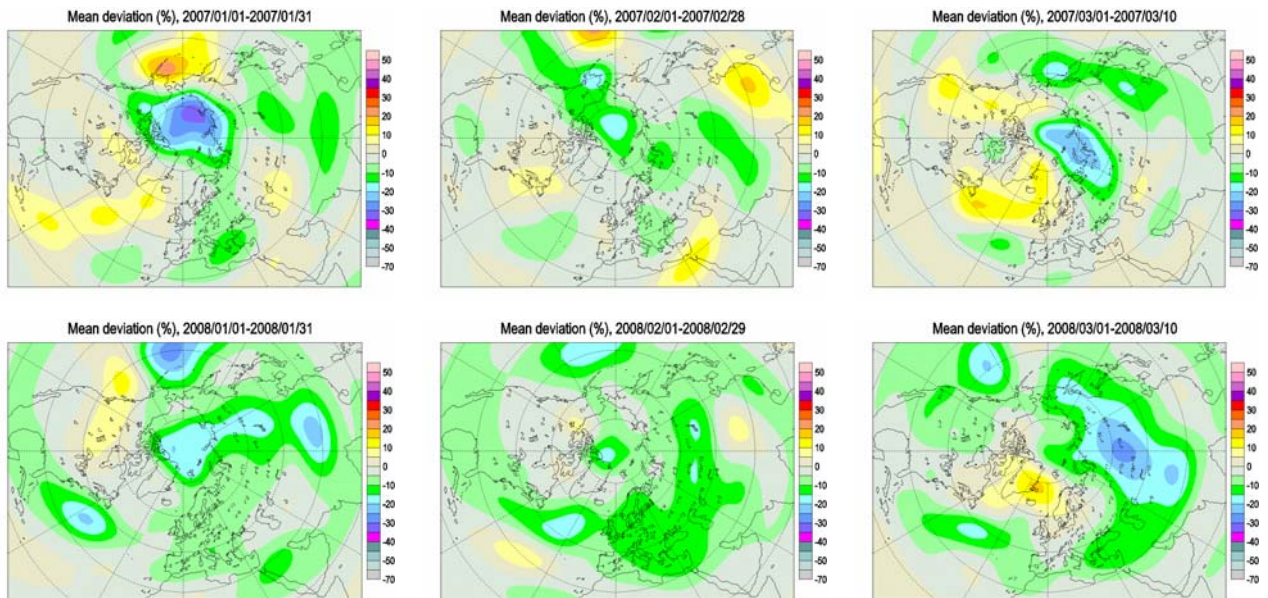


Рис. 6. Среднемесячные отклонения ОСО от многолетних средних значений с января по март для зимы 2006/07 (верхний ряд) и 2007/08 года (нижний ряд). Многолетние средние значения ОСО рассчитаны по данным спутникового прибора TOMS за период 1978-1988 г. 25-30% дефицит ОСО над Сибирью в марте 2007 и 2008 года.

обширными областями Арктики, Сибири, Тихого океана и Атлантики. В конце марта область низких значений ОСО (25 – 30% ниже климатической нормы) как и в предыдущем году, располагалась над Сибирью.

Химическое разрушение озона в полярном циклоне.

Расчеты химических потерь озона в полярном циклоне в зимне-весенний период проводились по данным спутниковых измерений озона MLS-AURA, а также данным баллонного зондирования на станции Салехард (67 с. ш., 67 в. д.) в 2006/07 году и на дрейфующей станции СП-35 (83÷85° с. ш) в 2007/08 году. Для расчета неадиабатического оседания воздушных масс в полярном циклоне использовалась модель радиационного переноса. На рис. 7 приведены результаты спутниковых и баллонных измерений отношения смеси озона на изоэнтропическом уровне 475 К для двух зим.

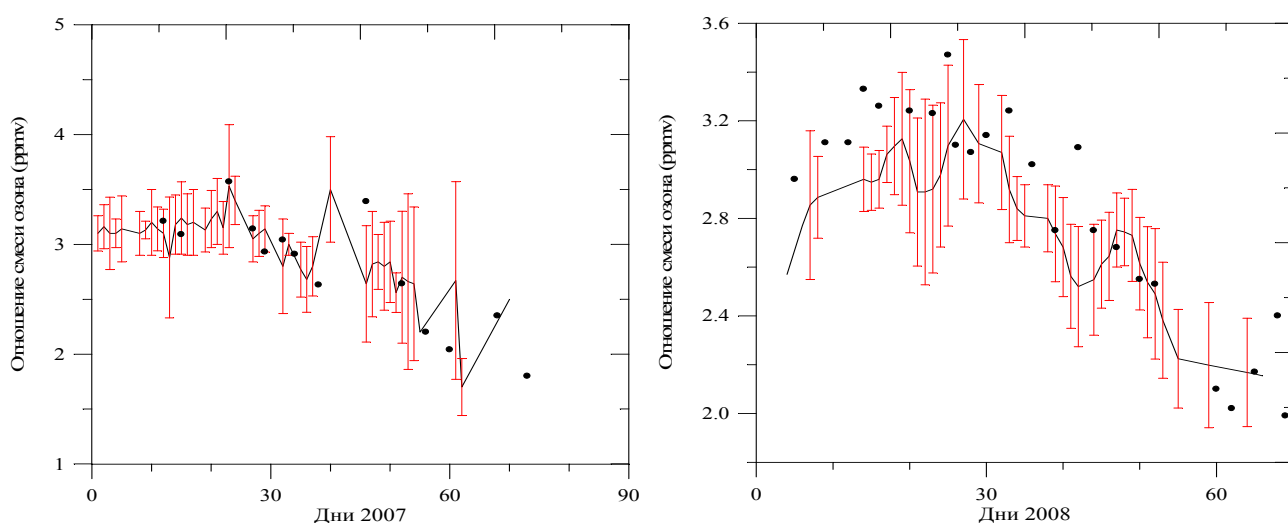


Рис. 7. Отношение смеси озона на изоэнтропическом уровне 475К в полярном циклоне зимой 2006/07 года (слева) и 2007/08 года (справа). Черная кривая – 5-дневное скользящее среднее по данным MLS-AURA. Точки – данные баллонного зондирования.

Заметное уменьшение отношения смеси озона наблюдалось на изоэнтропических уровнях 450 К – 525 К (17-23 км) со второй половины января до середины марта, в то время как в отсутствие химического разрушения озона динамические процессы (неадиабатическое оседание воздушных масс в полярном циклоне) должны были бы приводить к увеличению отношения смеси озона на стратосферных изэнтропических уровнях. Однако, совокупное действие динамического и химического процессов привело к 45%-му и 37%-му уменьшению отношения смеси озона на изоэнтропическом уровне 475 К зимой 2007 и 2008 года соответственно.

Процесс разрушения озона протекал примерно одинаково в течение двух зим. Заметное разрушение озона началось во второй половине января и достигло максимальной величины к концу февраля. В диапазоне потенциальных температур 450К-475К скорость химических потерь озона, постепенно увеличиваясь с середины января, достигла зимой 2007 года максимальных значений $-35 \div -40$ ppv в день к концу февраля, а в 2008 - около 50 ppv в день к началу февраля. Процесс химического разрушения завершился к середине марта в 2007 году и приблизительно на неделю раньше в 2008 году, то есть через две недели после финального потепления. Наиболее яркая финальная фаза этого процесса видна на профиле вертикального распределения озона, полученного 7 марта 2007 года на

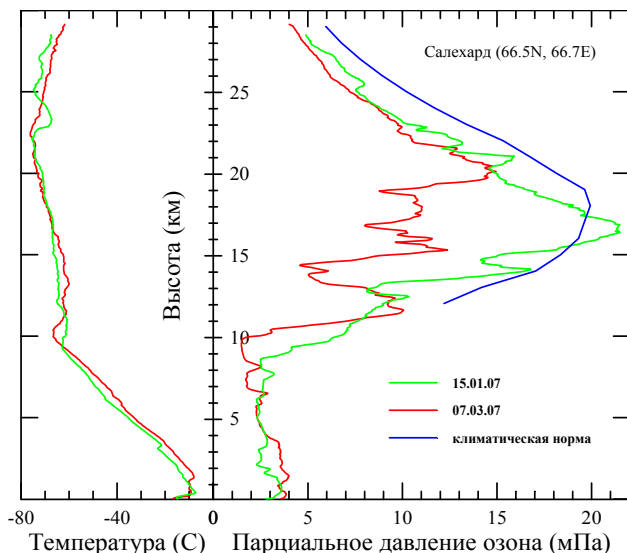


Рис. 8. Вертикальное распределение озона в полярном циклоне по измерениям на ст. Салехард в начальной (15.01.07, зеленая кривая) и финальной (07.03.07, красная кривая) стадии процесса химического разрушения озона.

станции Салехарде (рис 8). Такие профили с характерным «выеданием» в слое озонового максимума достаточно часто наблюдаются в Арктике в конце зимне-весеннего периода. На рис. 9 представлено вертикальное распределение суммарных за зимне-весенний период химических потерь озона в полярном циклоне, рассчитанных по данным баллонного зондирования на ст. Салехард в 2006/07 и СП-35 в 2007/08 году. Суммарные потери озона за зимне-весенний период на изоэнтропическом уровне 475 К составили ~1.6 ppt (~ 50 % от величины отношения смеси озона в январе до начала процесса химического разрушения озона) в 2006/07 году и несколько меньшую величину ~ 1.4 ppt (около 43%) в 2007/08 году. Величина химических потерь ОСО в полярном циклоне достигла значений 88 ± 17 е.Д. в 2006/07 г. и не менее 70 ± 12 е.Д. в 2007/08 г., что вполне сопоставимо со значительными потерями ОСО в холодные зимы последнего десятилетия (93 ± 13 е.Д. в 1999/2000г., 116 ± 10 е.Д. в 2004/05 г.). На рис. 10 приведена зависимость величины химических потерь ОСО от объема воздушной массы, занимаемой полярными стратосферными облаками в течение зимне-весеннего периода. Следует отметить тесную корреляцию между этими величинами.

станции Салехарде (рис 8). Такие профили с характерным «выеданием» в слое озонового максимума достаточно часто наблюдаются в Арктике в конце зимне-весеннего периода. На рис. 9 представлено вертикальное распределение суммарных за зимне-весенний период химических потерь озона в полярном циклоне, рассчитанных по данным баллонного зондирования на ст. Салехард в 2006/07 и СП-35 в 2007/08 году. Суммарные потери озона за зимне-весенний период на изоэнтропическом уровне 475 К составили ~1.6 ppt (~ 50 % от величины отношения смеси озона в январе до начала процесса химического разрушения озона) в 2006/07 году и несколько меньшую величину ~ 1.4 ppt (около 43%) в 2007/08 году. Величина химических потерь ОСО в полярном циклоне достигла значений 88 ± 17 е.Д. в 2006/07 г. и не менее 70 ± 12 е.Д. в 2007/08 г., что вполне сопоставимо со значительными потерями ОСО в холодные зимы последнего десятилетия (93 ± 13 е.Д. в 1999/2000г., 116 ± 10 е.Д. в 2004/05 г.). На рис. 10 приведена зависимость величины химических потерь ОСО от объема воздушной массы, занимаемой полярными стратосферными облаками в течение зимне-весеннего периода. Следует отметить тесную корреляцию между этими величинами.

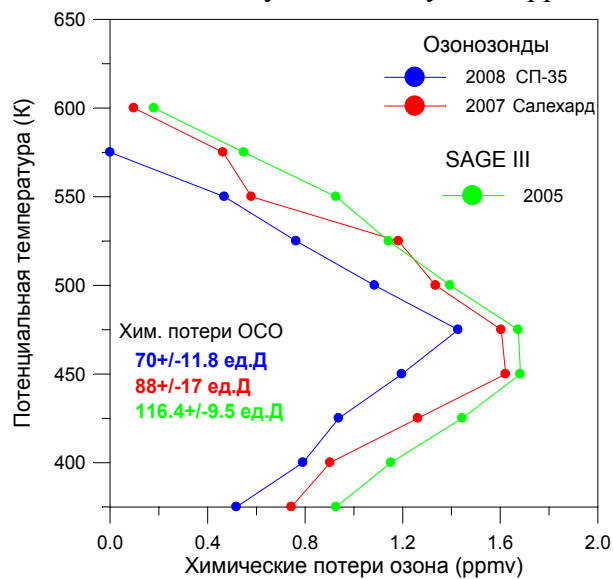


Рис. 9. Вертикальное распределение суммарных за зимне-весенний период химических потерь озона в полярном циклоне, по данным баллонного зондирования в Арктике.

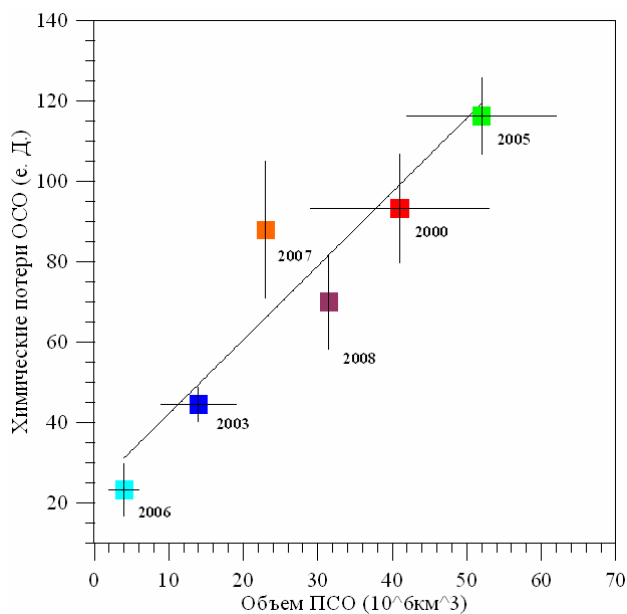


Рис. 10. Зависимость величины химических потерь ОСО от объема воздушной массы, занимаемой полярными стратосферными облаками в течение зимне-весеннего периода. Расчеты ХПО проведены по данным баллонных измерений озона на российских станциях Салехард (2000, 2003, 2007), СП-35 (2008) и данным спутниковых измерений SAGE III (2005) и MLS-AURA (2006).

Заключение

Две последние зимы принадлежат к группе холодных зим с сильным стабильным полярным циклоном и низкими стратосферными температурами, создающими благоприятные условия для значительного химического разрушения озона. Температуры ниже пороговых значений для образования ПСО I типа наблюдались непрерывно с декабря до конца февраля в широком диапазоне потенциальной температуры 450-650 К, а зимой 2008 года и выше – до уровня 675 К. Объем области, занимаемой полярными стратосферными облаками в течение зимне-весеннего периода, достигал в 2008 г. значения 38.4 млн км² и к настоящему времени занимает 4-е место по величине за время наблюдений в Арктике. К концу зимнего периода как 2007, так и 2008 года полярный циклон располагался над территорией Сибири, и в марте дефицит общего содержания озона в этом регионе составлял 25-30%. Величина химических потерь ОСО в полярном циклоне достигла значений 88±17 е.Д. в 2006/07 г. и не менее 70 ± 12 е.Д. в 2007/08 г., что вполне сопоставимо со значительными потерями ОСО в холодные зимы последнего десятилетия (93±13 е.Д. в 1999/2000г., 116± 10 е.Д. в 2004/05 г.). Таким образом, несмотря на некоторое снижение уровня озоноразрушающих веществ в стратосфере после 2000 года, термический режим в Арктике с периодическим очень сильным охлаждением зимней полярной стратосферы по-прежнему может приводить к значительным химическим потерям озона за счет более интенсивного образования полярных стратосферных облаков.

Источники данных

Бюллетень доступен на сайте ГУ ЦАО: http://www.cao-rhms.ru/ofvsa/index_LEI.html.

Работа проводилась в рамках темы ЦНТП Росгидромета **3.1.1 «Исследование особенностей современного климата и его изменений и усовершенствование государственной системы мониторинга климата».**

Расчеты ХПО проводились сотрудниками ЦАО на базе данных баллонного зондирования озона на российских станциях Салехард и Северный Полюс-35 с привлечением данных спутникового прибора MLS-AURA. Методика расчета ХПО приведена в работах:

Н.Д. Цветкова, Х. Накане, А.Н. Лукьянов, В.А. Юшков, В.М. Дорохов, И.Г. Зайцев, В.И. Ситникова Оценка скорости убывания озона в стратосферном арктическом циклоне в зимне-весенний период по данным баллонных измерений в Сибири в 1995-2000 гг.-Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, 2002, том 38, № 2, с. 211-219.

Н.Д. Цветкова, Х. Накане, В.А. Юшков, А.Н. Лукьянов, В.М. Дорохов. Оценка вклада химического разрушения озона в его общее содержание в арктическом полярном циклоне зимой 1999/2000 года. - Метеорология и гидрология, 2004, №10, стр. 56-63.

Анализ полей метеозлементов в течение зимне-весенних периодов 2006/07 и 2007/08 г.г. проводился на основе данных Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF). Анализ полей ОСО проводился на базе данных World Ozone and UV Data Centre at Environment Canada. Расчеты площади и объема ПСО проводились в Alfred Wegener Institute, Potsdam, Germany. Данные измерений озона спутниковым прибором MLS-AURA получены из GES Distributed Active Archive Center. Отдельная благодарность сотрудникам Арктического и антарктического научно-исследовательского института (Росгидромет), а также метеостанций Салехард и Северный Полюс-35 за организацию и проведение баллонных измерений озона.

Мониторинг состояния озонового слоя в Арктике на долговременной основе осуществляется учеными США и Европы (соответствующие отчеты доступны на сайтах US National Center for Environmental Prediction (NCEP): <http://www.cpc.noaa.gov/products/stratosphere> и European Ozone Research Coordinating Unit (EORCU): <http://www.ozone-sec.ch.cam.ac.uk>).