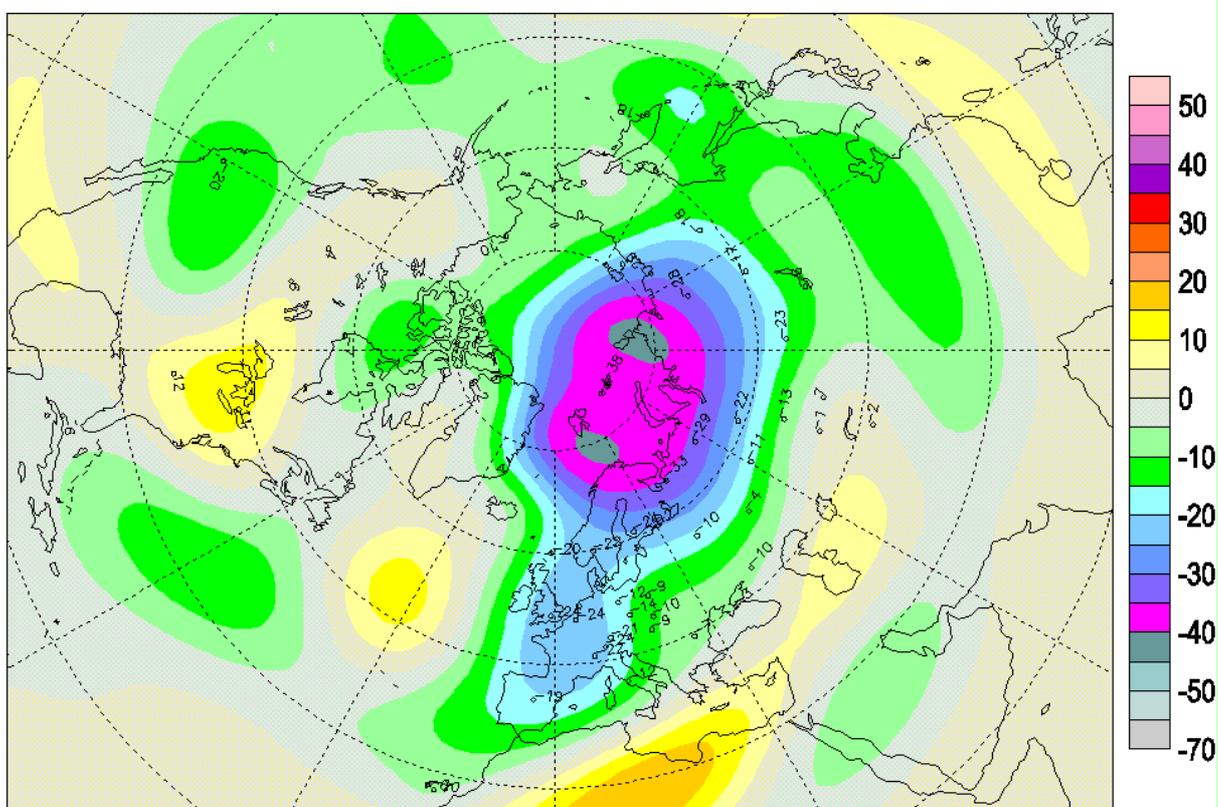


Состояние озонового слоя в Арктике

Зима 2010/11

Deviations (%) / Ecartis (%), 2011/04/01



Центральная аэрологическая обсерватория

Росгидромет

<http://www.cao-rhms.ru>

С момента открытия озоновой дыры в Антарктике в середине 80-х годов в научном мире ведется дискуссия о том, возможно ли сравнимое по масштабу разрушение озона в Арктике. Хотя процессы химического разрушения озона протекают одинаково в обоих полушариях, различия в эволюции полярного циклона и температурного режима полярной стратосферы, обусловленные динамикой, приводили до сих пор к существенной разнице в степени разрушения озона в Арктике и Антарктике. Однако химические потери озона весной 2011 года значительно превосходят все наблюдавшиеся ранее в арктическом полярном циклоне значения, что впервые дает основания говорить об озоновой дыре в Арктике.

В зимне-весенний период 2010/11 года Центральная аэрологическая обсерватория (Росгидромет) продолжала осуществлять мониторинг состояния озонового слоя в высоких широтах северного полушария. Для оценок химических потерь озона (ХПО) в полярном циклоне использовались данные спутникового прибора MLS-AURA и баллонных измерений озона на станциях сети NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change).

Метеорология полярного циклона

Впервые за время наблюдений в Арктике зимой 2010/11 года условия для химического разрушения озона в полярном циклоне были сравнимы с антарктическими. Необычайно сильный и стабильный полярный циклон, более длительный, чем обычно в Арктике, период существования низких температур, а также рекордные пространственные размеры области формирования полярных стратосферных облаков (ПСО) создали условия для значительного увеличения содержания ClO и степени денитрификации в полярной арктической стратосфере, характерные для теплых зим в Антарктике.

Крайне слабая активность планетарных волн в тропосфере в течение зимы привела к формированию очень сильного и стабильного полярного циклона, постоянно усиливающегося вплоть до конца марта, и к поздней весенней перестройке в конце апреля. На рис. 1 показано изменение силы полярного циклона в терминах средней потенциальной завихренности (ПЗ) на изэнтропическом уровне 475 К (19 км) зимой 2010/11 года в сравнении с аналогичной величиной за последнее десятилетие. Размер циклона оставался практически неизменным с середины января до начала апреля и составлял около $20 \times 10^6 \text{ км}^2$ на уровнях потенциальной температуры 450-550 К (18-23 км). Большую часть периода циклон располагался над полюсом, однако эпизодически наблюдающаяся волновая активность иногда приводила к деформации и смещению

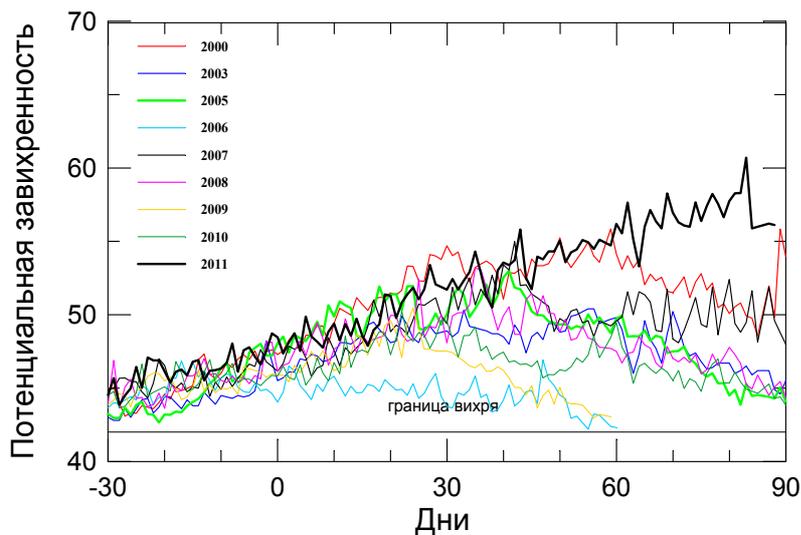


Рис. 1. Средняя потенциальная завихренность (ПЗ) в полярном циклоне на изэнтропическом уровне 475 К (19 км). Данные получены путем осреднения всех значений. ПЗ в узлах регулярной сетки внутри циклона. Значение ПЗ=42 ед (10^{-6} км² /кгс) принимается за границу циклона.

циклона. Так, например, 3 февраля вследствие внезапного стратосферного потепления произошло разделение циклона на две части с последующим быстрым восстановлением через два дня. Менее интенсивные волновые воздействия приводили к периодическому вытягиванию формы циклона, а также к его филаментации с выносом циклонических воздушных масс за его пределы. Два потепления в конце марта и в начале апреля привели к смещению циклона в сторону Сибири, а затем и северной Европы, где он удерживался до своего финального разрушения в конце апреля.

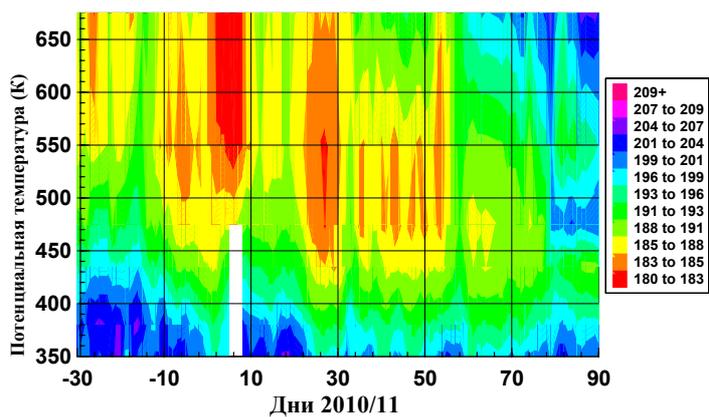


Рис. 2. Вертикальное распределение минимальных температур в полярном циклоне в течение зимне-весеннего периода 2010/11 г.г.

Вертикальное распределение минимальных температур в течение зимне-весеннего периода и изменение ежедневной минимальной температуры в полярном циклоне на изэнтропическом уровне 475 К (~19 км) для зимы 2010/11 г.г. приведено на рис. 2 и 3 соответственно. На рис. 4 показано изменение площади образования полярных стратосферных облаков (ПСО) на изэнтропическом уровне 475К в течение зимы. Хотя

ежедневные значения минимальной температуры не были необычно низкими, однако длительность холодного периода, его непрерывность и вертикальная протяженность области низких температур существенно превосходили ранее наблюдавшиеся значения.

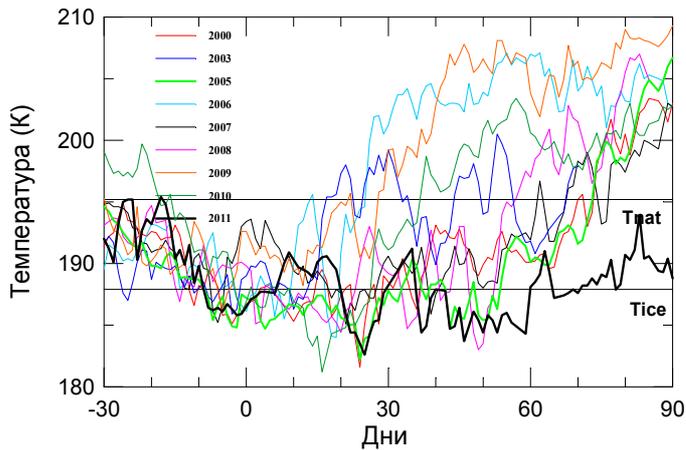


Рис. 3. Изменение ежедневной минимальной температуры в полярном циклоне на изэнтропическом уровне 475 К (~19 км). Черными прямыми обозначены пороговые для образования ПСО I и II типа значения температуры.

Температура ниже пороговой для образования полярных стратосферных облаков наблюдалась более 100 дней (с начала декабря до конца марта) в широком диапазоне высот 15 – 23 км. В течение первой половины января область образования ПСО I типа простиралась до необычайно высокого уровня потенциальной температуры 950 К (свыше 30 км). С середины января до конца февраля температуры ниже пороговых значений для образования ПСО I типа наблюдались непрерывно в диапазоне потенциальной температуры 400-600 К (15-25км), в течение марта верхняя граница области образования ПСО опустилась до высоты ~21 км (500 К). В третьей декаде января и в течение практически всего февраля на некоторых уровнях температура в стратосфере опускалась ниже пороговой для образования ПСО II типа (ледяных частиц). Суммарный объем воздушных масс с благоприятными для формирования ПСО условиями зимой 2010/11 года достиг рекордных для Арктики значений более 70 млн км³.

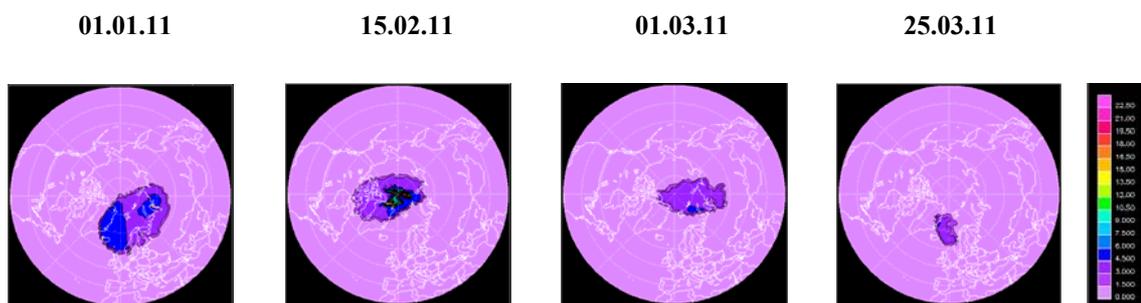


Рис. 4. Площадь возможного образования полярных стратосферных облаков на изэнтропическом уровне 475К зимой 2010/11 г.г. Цветовой шкалой отмечена удельная площадь поверхности частиц ПСО ($\mu\text{км}^2 / \text{см}^3$).

Эволюция химического состава стратосферы в арктическом циклоне также развивалась по антарктическому сценарию. Уменьшение концентрации HCl и увеличение ClO наблюдаются в Арктике каждую холодную зиму, но никогда еще процесс активации хлора

не был столь обширным и длительным. Средняя по циклону концентрация HCl на уровне потенциальной температуры 475 К (~20 км) по данным спутникового прибора MLS-AURA уменьшилась от значений 1.8 ppbv в начале декабря до значений 0.3 ppbv в начале марта, а концентрация ClO соответственно возросла за тот же период от практически нулевых значений до 1.2 ppbv. К числу факторов, усиливающих химическое разрушение озона в полярном циклоне, относится процесс денитрификации стратосферы, замедляющий деактивацию хлора посредством преобразования в неактивный резервуар ClONO₂ (обычный для Арктики механизм деактивации хлора). Существование столь длительного холодного интервала в зимне-весенний период 2010/11 года привело к образованию достаточно больших частиц ПСО, вследствие седиментации которых степень денитрификации стратосферы к концу марта 2011 года достигла 40% уровня.

Эволюция общего содержания озона в Арктике

Изменение общего содержания озона (ОСО) в арктических широтах в течение зимне-весеннего периода определяется, в основном, присутствием стратосферного полярного циклона и является результатом совокупного действия динамических и химических

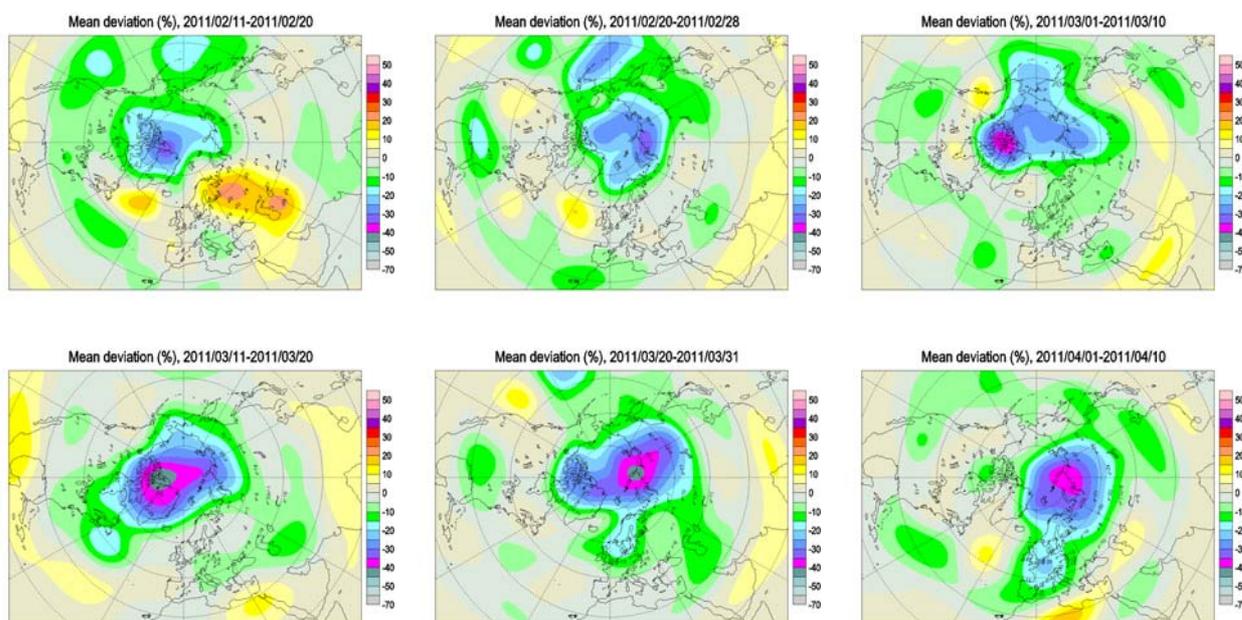


Рис. 5. Отклонения ОСО (%) от многолетних средних значений с февраля по апрель 2011 года, осредненные за 10 дней.

процессов.

В течение длительного периода с февраля по апрель 2011 года над полярными широтами северного полушария наблюдались чрезвычайно низкие значения ОСО, в среднем, на 40% ниже климатической нормы. Минимальные значения ОСО меньше 250 е. Д. наблюдались весной в течение ~27 дней, а в течение недели в конце марта значения ОСО падали до

величины 220_230 е. Д. На рис. 5 приведена пространственно - временная эволюция осредненных за 10-дневный период отклонений ОСО от многолетних средних значений с февраля по апрель 2011 года. Многолетние средние значения ОСО рассчитаны по данным спутникового прибора TOMS за период 1978-1988 г.г. В течение февраля полярный стратосферный циклон располагался практически над полюсом, с небольшим фрагментом над северным Тихим океаном в конце февраля. Дефицит озона в этот период достигал 35%. В течение марта циклон вытянулся в направлении северной Канады и Сибири, а дефицит озона увеличился. Максимальные отклонения от многолетних средних значений (до -45%) наблюдались во второй декаде марта над Гренландией и северной Канадой, а в третьей декаде марта над северными районами Сибири. В течение первой декады апреля центр циклона располагался над Сибирью и северной Скандинавией, где дефицит ОСО составлял 30-40%, а затем полярные воздушные массы с низким содержанием озона (на 25% ниже многолетних средних значений) сместились в Центральную Европу.

Химическое разрушение озона в полярном циклоне.

Расчеты химических потерь озона в полярном циклоне в зимне-весенний период 2010/11 года проводились по данным спутникового прибора MLS-AURA и баллонных измерений озона на станциях сети NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition

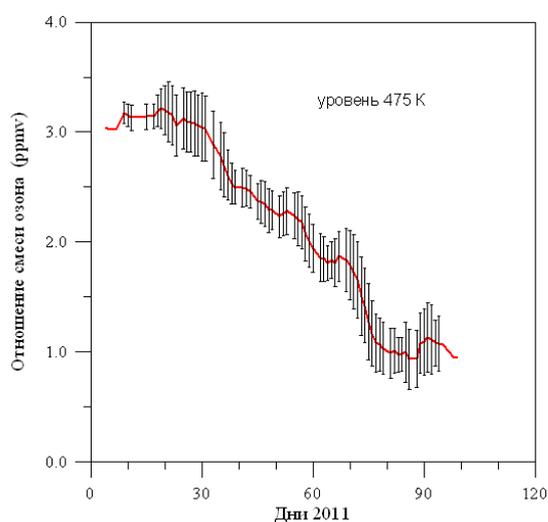


Рис. 6. Среднее по площади циклона отношение смеси озона (7-дневное скользящее среднее значение) на изоэнтропическом уровне 475К в зимне-весенний период 2010/11 года по данным MLS-AURA и сети NDACC.

Change). Для расчета неадиабатического оседания воздушных масс в полярном циклоне использовалась радиационная модель. На рис. 6 приведены результаты измерений отношения смеси озона на изоэнтропическом уровне 475 К в полярном циклоне. В конце января на изоэнтропических уровнях 400-650 К (15-22 км) началось резкое уменьшение отношения смеси озона, длившееся до середины апреля и указывающее на преобладание

процесса химического разрушения озона в тот период, когда полярный циклон сместился в освещенную область. В конце марта - начале апреля в некоторых озоновых профилях отношение смеси озона в интервале 18-20 км уменьшилось до значений 0.5-0.7 ppb. Среднее по циклону отношение смеси озона на уровне 475 К (~18 км) к концу марта уменьшилось на 2 ppb (т. е. более чем на 70%) по сравнению со значениями в начале января.

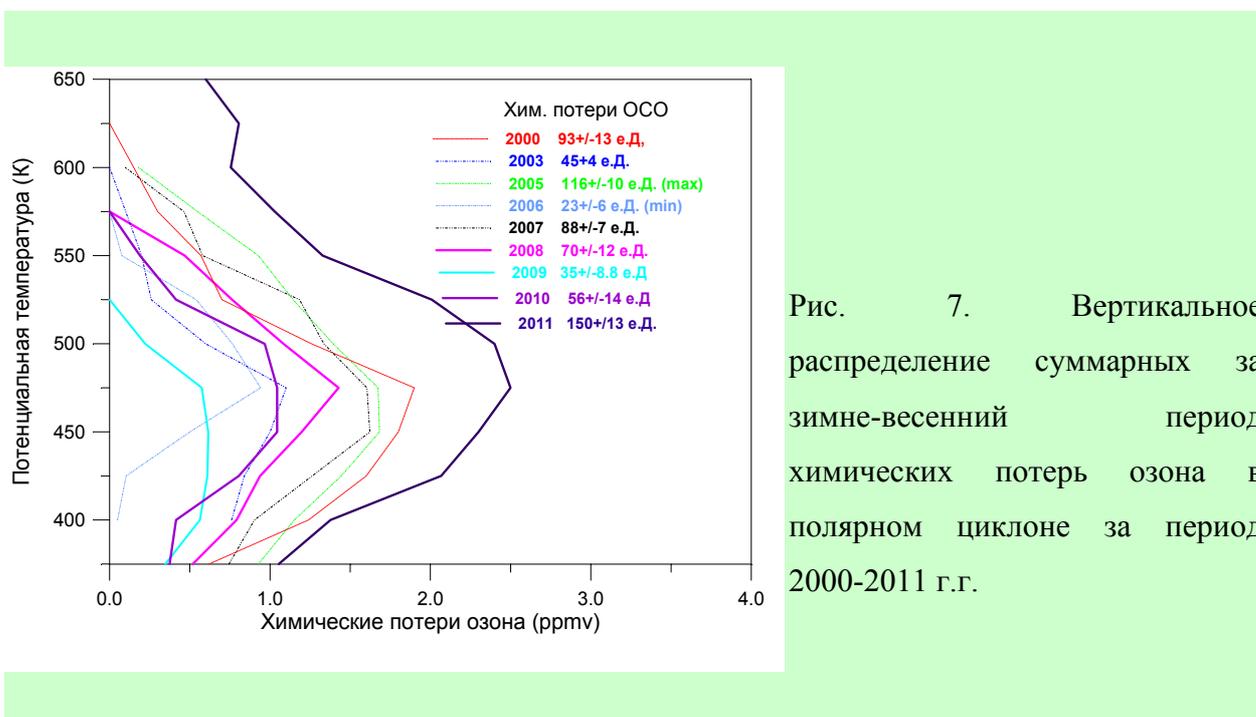


Рис. 7. Вертикальное распределение суммарных за зимне-весенний период химических потерь озона в полярном циклоне за период 2000-2011 г.г.

На рис. 7 представлены результаты расчета средних по циклону химических потерь озона за период с 5 января по 8 апреля 2011 г. по данным баллонного зондирования озона и спутникового прибора MLS-AURA в сравнении с данными, полученными за предыдущие годы. Процесс химического разрушения озона протекал наиболее интенсивно в диапазоне потенциальных температур 400-650 К (15-22 км). Максимум химических озоновых потерь (ХПО) более 2.5 ppb наблюдался на изоэнтропическом уровне 475 К. Скорость химических потерь озона на этом уровне к середине марта достигла значений 100 ppb в день. Величина химических потерь ОСО в полярном циклоне зимой 2010/11 года составляла 150 ± 13 е.Д. – это рекордная величина ХПО за весь период наблюдений в Арктике (предыдущий рекорд наблюдался зимой 2004/05 года и составлял 116 е. Д.). На рис. 8 приведена зависимость величины химических потерь ОСО от величины объема воздушной массы, занимаемой полярными стратосферными облаками в течение зимне-весеннего периода. Величина ХПО за зимне-весенний период 2010/11 года еще раз подтверждает существование линейной зависимости между этими величинами.

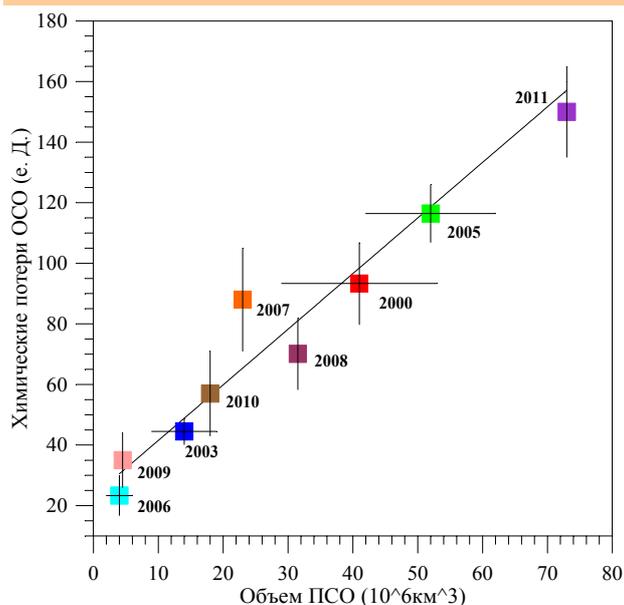


Рис. 8. Зависимость величины химических потерь ОСО от объема воздушной массы, занимаемой полярными стратосферными облаками в течение зимне-весеннего периода. Расчеты ХПО проведены по данным баллонных измерений озона на российских станциях Салехард (2000, 2003, 2007), СП-35 (2008) и данным спутниковых измерений SAGE III (2005) и MLS-AURA (2006, 2009, 2010, 2011).

Заключение

Впервые за время наблюдений в Арктике зимой 2010/11 года условия для химического разрушения озона в полярном циклоне были сравнимы с антарктическими. Необычайно сильный и стабильный полярный циклон, более длительный, чем обычно в Арктике, период существования низких температур, а также рекордные пространственные размеры области формирования полярных стратосферных облаков (ПСО) создали условия для значительного увеличения содержания СЮ и степени денитрификации в полярной арктической стратосфере, характерные для теплых зим в Антарктике.

Крайне слабая активность планетарных волн в тропосфере в течение зимы привела к формированию очень сильного и стабильного полярного циклона, постоянно усиливающегося вплоть до конца марта, и к поздней весенней перестройке в конце апреля. Температура ниже пороговой для образования полярных стратосферных облаков наблюдалась более 100 дней (с начала декабря до конца марта) в широком диапазоне высот 15 – 23 км.

Эволюция химического состава стратосферы в арктическом циклоне также развивалась по антарктическому сценарию. Существенная денитрификации стратосферы, достигшая к концу марта 2011 года 40% уровня, замедлила процесс деактивации хлора в период после исчезновения ПСО, тем самым значительно продлив период химического разрушения озона в полярном циклоне. Максимум химических озоновых потерь (ХПО) более 2.5 ppт наблюдался на изоэнтропическом уровне 475 К (19 км). Скорость химических потерь озона на этом уровне к середине марта достигла значений 100 ppb в день. Величина

химических потерь ОСО в полярном циклоне зимой 2010/11 года составляла 150 ± 13 е.Д. – это рекордная величина потерь за весь период наблюдений в Арктике (предыдущий рекорд наблюдался зимой 2004/05 года и составлял 116 е. Д.).

Источники данных

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

Работа проводилась в рамках темы ЦНТП Росгидромета **1.3.1.1 «Мониторинг изменений современного климата Российской Федерации, ее регионов и федеральных округов (субъектов РФ)»**

Расчеты ХПО в зимне-весенний период 2010/11 года проводились сотрудниками ЦАО на базе данных баллонного зондирования озона на станциях сети NDACC и спутникового прибора MLS-AURA. Данные измерений озона спутниковым прибором MLS-AURA получены на сайте GES Distributed Active Archive Center.

Анализ полей метеоэлементов в течение зимне-весеннего периода 2010/11 года 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.

Модельные данные по площади возможного образования ПСО получены на сайте ETHER (Centre for Atmospheric Chemistry Products and Services).

Расчеты объема ПСО до 2008 года проводились в Alfred Wegener Institute, Potsdam, Germany, объем ПСО после 2008 года рассчитан сотрудниками ЦАО.

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>).