

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551.510.534

Аномалии стратосферного содержания NO_2 над Сибирью, связанные с арктической озоновой дырой 2011 г.

В.Ю. Агеева¹, М.В. Гришаев², А.Н. Груздев¹, А.С. Елохов¹, Н.С. Сальникова^{2*}

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 25.07.2013 г.

По результатам наземных спектрометрических измерений стратосферного содержания NO_2 в Томске (Западная Сибирь) и Жиганске (Восточная Сибирь) обнаружены значительные отрицательные аномалии диоксида азота в зимне-весенний период 2011 г. Отрицательные аномалии NO_2 наблюдались и в другие годы, но аномалии 2011 г. были рекордными. Значительные понижения содержания NO_2 сопровождались отрицательными аномалиями общего содержания озона (ОСО), температуры и высот изобарических поверхностей в стратосфере. Анализ траекторий атмосферного переноса и горизонтального распределения ОСО показал, что уменьшение стратосферного содержания NO_2 в зимне-весенние периоды вызвано переносом стратосферного воздуха из областей пониженного содержания озона. Вертикальные профили NO_2 в Томске указывают на то, что, по всей вероятности, определенный вклад в аномалии NO_2 в начале весны 2011 г. внесла денитрификация полярной стратосферы в области арктической озоновой дыры.

Ключевые слова: диоксид азота, озон, озоновая дыра, аномалии; nitrogen dioxide, ozone, ozone hole, anomalies.

Введение

Истощение озонового слоя является одной из актуальных проблем физики и химии атмосферы. Экстремальных величин оно достигает весной над Антарктикой и известно как антарктическая «озоновая дыра».

Озоновая дыра наблюдается в условиях динамической изоляции стратосферы Антарктики, приводящей к сильному выхолаживанию стратосферы с образованием стратосферных полярных облаков [1]. В результате гетерогенных реакций на поверхности частиц этих облаков происходит уменьшение концентрации газообразных азотсодержащих составляющих атмосферы (так называемая денитрификация атмосферы). Как следствие, хлорный цикл разрушения озона становится чрезвычайно эффективным, приводя к сильному химическому разрушению озона в нижней стратосфере Антарктики.

В начале 2011 г. в Арктике было аномально низкое содержание стратосферного озона [2]. Уменьшение содержания озона впервые за весь период наблюдений оказалось сопоставимым с его уменьшением в области антарктической озоновой дыры. Такое сильное истощение озонового слоя над Арктическим регионом

явилось следствием совокупности факторов: интенсивного, слабо возмущенного циркулярного стратосферного вихря, сильного охлаждения стратосферы, образования и длительного существования полярных стратосферных облаков (вплоть до конца марта) и, как результат, денитрификации стратосферы [2–5].

Отрицательная аномалия стратосферного содержания NO_2 в зимне-весенний период 2011 г., обусловленная переносом воздуха из области арктической озоновой дыры, была впервые обнаружена по измерениям на Звенигородской научной станции ИФА РАН [6]. Было показано, что экстремально низкое значение содержания NO_2 в вертикальном столбе стратосферы явилось следствием дефицита NO_2 в нижней стратосфере, вызванного денитрификацией арктической стратосферы в конце зимы 2011 г. Уменьшение содержания NO_2 в стратосферном столбе составило около 40% от среднего значения для этого времени года.

Измерения содержания NO_2 в вертикальном столбе атмосферы выполняются на нескольких российских станциях. Анализ таких измерений представляет интерес, так как он позволил бы расширить полученные в [6] результаты на более обширную территорию и исследовать общие закономерности аномалий NO_2 .

Целью нашей работы является анализ аномалий стратосферного содержания NO_2 над территорией Сибири в связи с арктической озоновой дырой в зимне-весенний период 2011 г.

* Виктория Юрьевна Агеева (ageyevavy@tut.by); Михаил Владиславович Гришаев (grishaev@iao.ru); Александр Николаевич Груздев (a.n.gruzdev@mail.ru); Александр Сульманович Елохов (elokhov@mail.ru); Наталья Сергеевна Сальникова (elnikov@iao.ru).

Данные и метод анализа

В статье анализируются результаты измерений общего содержания NO_2 в Жиганске ($66,79^\circ$ с.ш., $123,35^\circ$ в.д.) и Томске ($56,50^\circ$ с.ш., $84,97^\circ$ в.д.). Томск расположен в Западной Сибири на широте, близкой к широте Звенигорода, а Жиганск — за полярным кругом в Восточной Сибири.

Остановимся на методиках измерения содержания NO_2 на этих станциях, так как существенное влияние на общее содержание NO_2 могут оказывать эпизоды загрязнения нижней тропосферы окислами азота. В отсутствие загрязнения пограничного слоя атмосферы окислами азота общее содержание NO_2 практически полностью определяется его стратосферным содержанием. В дальнейшем, говоря об общем содержании NO_2 , будем подразумевать главным образом его стратосферное содержание.

Измерения общего содержания NO_2 на обеих станциях выполняются спектрометрическим методом в видимой области спектра по рассеянному из зенита солнечному излучению во время утренних и вечерних сумерек. Результаты измерений приводятся к зенитному углу Солнца 90° .

Измерения общего содержания NO_2 в Жиганске ведутся с 1992 г. с помощью спектрометра SAOZ (Syste'me d'Analyse par Observation Zenithale). Измерения усредняются в диапазоне солнечных зенитных углов $86\text{--}91^\circ$. Данные измерений в Жиганске находятся в открытом доступе на сайте международной Сети по обнаружению изменений состава атмосферы (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change — NDACC) по адресу: <http://www.ndacc.org/>. Общее содержание NO_2 в Жиганске отражает, главным образом, вклад стратосферного содержания, так как Жиганск удален от промышленных центров и тропосферное содержание NO_2 , связанное с антропогенной деятельностью, там обычно незначительно.

Измерения общего содержания NO_2 в Томске проводятся с 1996 г. с помощью монохроматора МДР-23 при зенитных углах Солнца $84\text{--}96^\circ$. Методика измерений в Томске аналогична методике измерений на Звенигородской научной станции и описана подробно в [7, 8]. Широкий диапазон зенитных углов, в котором выполняются измерения в Томске, позволяет восстанавливать вертикальное распределение NO_2 в результате решения обратной задачи [7, 8]. Это позволяет определять интегральное содержание NO_2 в атмосфере, исключая нижний слой, в котором содержание NO_2 может быть большим во время эпизодов антропогенного загрязнения. Такое интегральное содержание близко к общему содержанию NO_2 в стратосферном столбе.

Для выявления аномалий общего содержания NO_2 был проведен анализ результатов измерений в Жиганске за период с 1992 по 2012 г. и в Томске с 1996 по 2012 г. Для Жиганска сначала были рассчитаны многолетние среднемесячные значения содержания NO_2 . При их расчете были исключены данные за 1992–1994 гг., на которые повлияли про-

дукты извержения влк. Пинатубо [9, 10]. По многолетним среднемесячным значениям, путем разложения в ряд Фурье, были вычислены амплитуды и фазы гармоник спектральных компонент годового хода. Средний годовой ход для произвольного времени года определялся как суперпозиция Фурье-компонент для этого момента времени. Затем были рассчитаны отклонения содержания NO_2 как разность между исходными данными, из которых был удален линейный тренд, и средним годовым ходом. Линейные тренды были оценены по методу, описанному в [9], а используемый метод исключения годового хода — в [11]. Отклонения содержания NO_2 для Томска получены вычитанием из текущего значения многолетнего среднего значения, соответствующего этой дате. Отклонения содержания NO_2 в Томске и Жиганске были сглажены скользящим средним по трем точкам.

К анализу были также привлечены данные об общем содержании озона (OCO), полученные с помощью прибора OMI (Ozone Monitoring Instrument), установленного на спутнике EOS-Aura, и данные аэрологического зондирования: (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>). Аэрологическое зондирование в Томске не проводится, поэтому были использованы данные на станциях Колпашево ($58,31^\circ$ с.ш., $82,95^\circ$ в.д.) и Новосибирск ($55,03^\circ$ с.ш., $82,90^\circ$ в.д.) — ближайших к Томску пунктов зондирования. Для извлечения численных данных об OCO и визуализации озоновых полей был использован интернет-сервис Giovanni (http://gdata1-ts1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=omi).

По данным об OCO и данным радиозондирования по изложенной выше методике, примененной к данным об NO_2 в Жиганске, были рассчитаны отклонения OCO, температуры и высот изобарических поверхностей.

Результаты

Отклонения общего содержания NO_2 , OCO, температуры на изобарической поверхности 50 гПа и высоты этой поверхности за 2010 г. и первую половину 2011 г. в Жиганске представлены на рис. 1, а в Томске — на рис. 2. Вертикальными линиями отмечены положения значительных отрицательных аномалий содержания NO_2 .

Отрицательные аномалии общего содержания NO_2 случаются практически каждый год, но аномалии 2011 г. были рекордными за весь период наблюдений. На рис. 1 выделяются три отрицательные аномалии общего содержания NO_2 в зимне-весенний период 2011 г. над Жиганском: 24 января, двухэтапная аномалия с пиками 20 февраля и 4 марта, а также самая значительная аномалия 21 марта. В 2010 г. в Жиганске отмечена одна продолжительная отрицательная аномалия с пиками 4 и 10 марта.

Согласно рис. 2 в зимне-весенний период 2011 г. в Томске были четыре значительные отрицательные аномалии стратосферного содержания NO_2 : 24 января, 27 февраля, 23 марта и самая значительная двухэтапная аномалия с пиками 7 и 21 апреля.

В 2010 г. в Томске отмечены аномалии 21 января, 20 февраля и 2 марта.

Все значительные отрицательные аномалии содержания NO_2 на рис. 1 и 2, за исключением ано-

малий 20 февраля и 2 марта 2010 г. над Томском, сопровождались уменьшением OSO , температуры на изобарической поверхности 50 гПа и высоты этой поверхности.

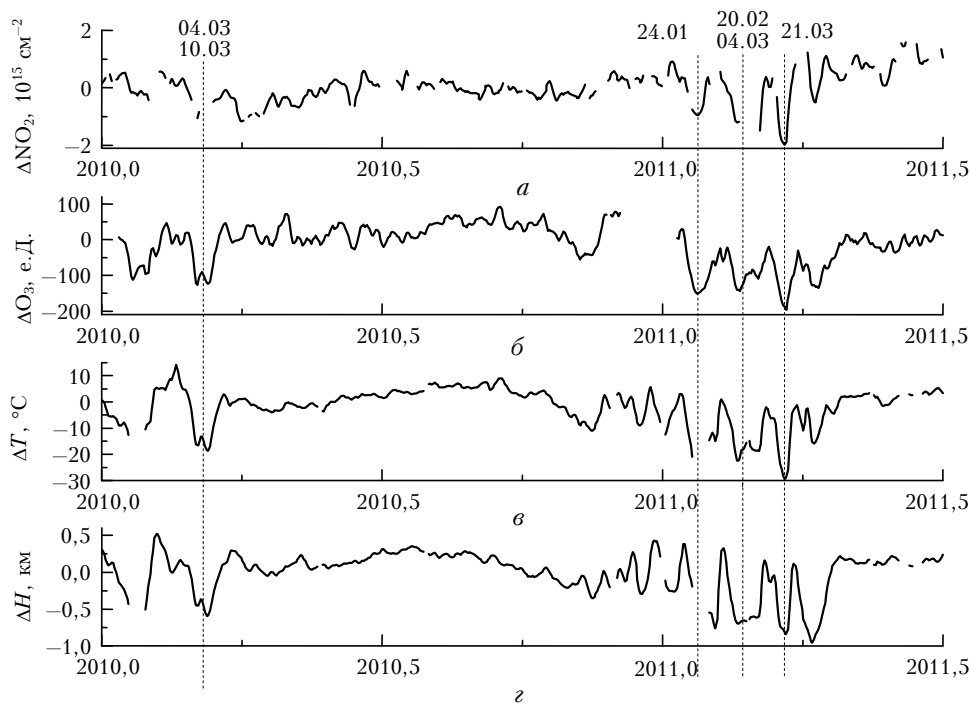


Рис. 1. Отклонения от многолетнего среднего годового хода над Жиганском в течение 2010–2011 гг.: вечернего значения содержания NO_2 (а), OSO (б), температуры на изобарической поверхности 50 гПа (в), высоты изобарической поверхности 50 гПа (г)

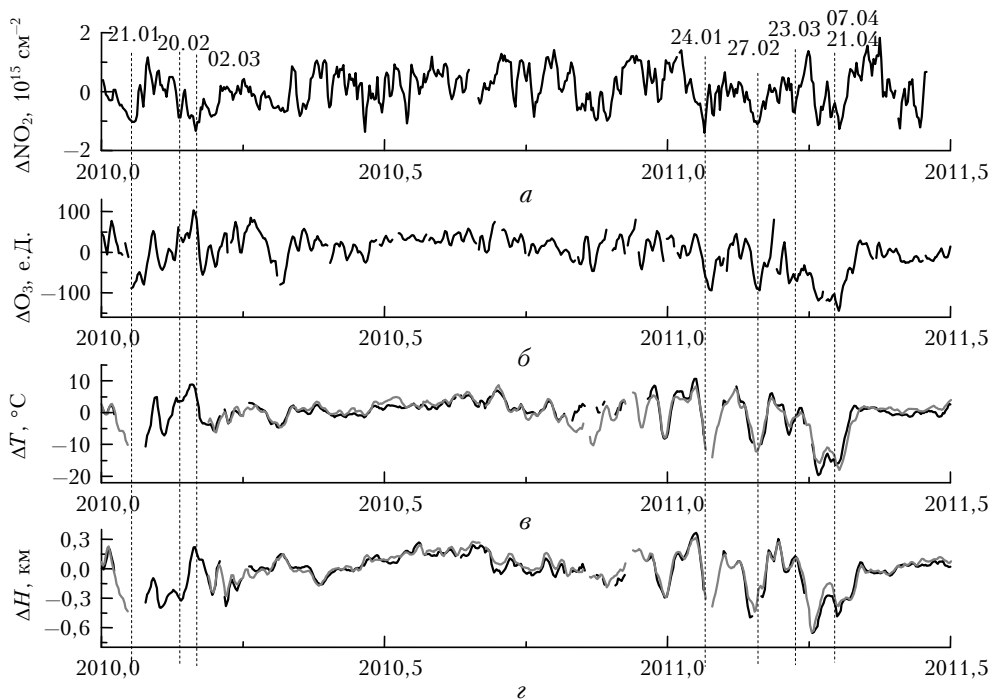


Рис. 2. Отклонения от многолетнего среднего годового хода в течение 2010–2011 гг.: вечернего значения содержания NO_2 над Томском (а), OSO над Томском (б), температуры на изобарической поверхности 50 гПа над Колпашевом (черная кривая) и Новосибирском (серая кривая) (в), высоты изобарической поверхности 50 гПа над Колпашевом (черная кривая) и Новосибирском (серая кривая) (г)

Для интерпретации аномалий содержания NO_2 был проведен анализ траекторий атмосферного переноса с помощью траекторной модели HYSPLIT (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>). На рис. 3 приведены трехсуточные траектории стратосферного переноса в точку с координатами Жиганска в даты, соответствующие двум отрицательным аномалиям NO_2 в 2010 и 2011 гг. (б, д), предшествующие этим аномалиям (а, з) и следующие за ними (в, е). На рис. 4 аналогичным образом для аномалии 7 апреля 2011 г. представлены траектории переноса в точку с координатами Томска. Высоты траекторий 20, 24 и 30 км были выбраны в связи с тем, что максимум температурной аномалии приблизительно соответствует высоте 20 км, а максимум содержания NO_2 в стратосфере — высоте 30 км. Время прихода траекторий в точки с координатами Жиганска или Томска приблизительно соответствует времени вечерних измерений содержания NO_2 . Траектории наложены на распределения ОСО, соответствующие указанным датам прихода траекторий, с помощью программы Google Earth. В начале года стратосферный озон химически достаточно инертен и может служить трассером атмосферного движения. Поэтому по динамике озонового поля можно косвенно судить об эволюции стратосферного циркумполярного вихря.

Стратосферные траектории, соответствующие аномалии NO_2 4 марта 2010 г. в Жиганске, сконцентрированы в области озонового минимума (рис. 3, б). Анализ распределения ОСО показал, что с начала и по середину марта 2010 г. Жиганск находился в области пониженного содержания озона (300–350 е.Д.), тогда как на полюсе в это время значение ОСО было высоким (400–500 е.Д.). Аномалии в марте 2010 г. над Жиганском были вызваны стратосферным переносом из области пониженного содержания озона. Перенос по траекториям, показанным на рис. 3, а, в, происходит через область с более высокими значениями ОСО. Так, траектории с датой прихода 27 февраля 2010 г., предшествующей дате развития аномалии над Жиганском, проходят через северный полюс (рис. 3, а), и на момент их прохода через полюс ОСО в Арктике было высоким (распределение ОСО сильно изменилось в течение 3 сут). Траектории на рис. 3, в огибают область пониженного содержания озона в распределении, соответствующем 14 марта 2010 г. В течение всего предшествующего трехсуточного периода перенос осуществлялся через область с высоким ОСО.

В отличие от марта 2010 г. в начале марта 2011 г. вплоть до конца второй декады область пониженного содержания озона (250–300 е.Д.) располагалась над Арктикой. В начале третьей декады стратосферный циркумполярный вихрь приобрел вытянутую форму. 21 марта 2011 г. Жиганск оказался в области циркумполярного вихря с низким значением ОСО, что привело к самой сильной отрицательной аномалии NO_2 в 2011 г. (рис. 3, д). Отклонение стратосферного содержания NO_2 от многолетнего среднего годового хода для этой анома-

лии составило 60% от среднего для этого времени года значения, ОСО было меньше многолетнего среднего на 195 е.Д., температура — на 29 °С, высота — на 840 м.

Из рис. 3, д следует, что траектории с датой прихода 21 марта 2011 г. проходят непосредственно через область озонового минимума, положение которого на протяжении 3 сут изменялось незначительно. Траектории для даты 15 марта 2011 г. (рис. 3, з), предшествующей аномалии NO_2 , и 25 марта 2011 г. (рис. 3, е), следующей за ней, имеют преимущественно долготную составляющую и проходят вдоль периферии области озонового минимума.

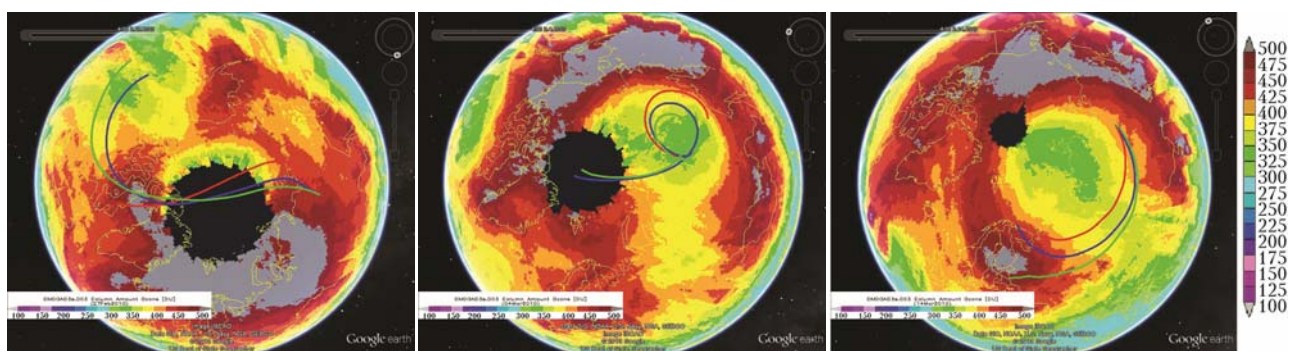
Аномалия стратосферного содержания NO_2 23 марта 2011 г. в Томске была не столь значительной. В этот день Томск находился на периферии области озонового минимума. В апреле 2011 г. эта область сместилась в сторону Томска (рис. 4, б). В итоге двухэтапная апрельская аномалия стратосферного содержания NO_2 в Томске была самой значительной за зимне-весенний период 2011 г. Изменение характера стратосферного переноса и полей ОСО для этой аномалии продемонстрировано на рис. 4.

Анализ траекторий и распределения ОСО подтвердил, что и другие отрицательные аномалии стратосферного содержания NO_2 в 2011 г. над Жиганском были вызваны заносом стратосферного воздуха из области циркумполярного вихря. Это справедливо и для аномалий в Томске. Следует отметить: даты аномалий общего содержания NO_2 в 2011 г. в Жиганске и Томске близки, что связано с эволюцией циркумполярного вихря.

Аномалии NO_2 2 марта 2010 г. в Томске отмечены при высоком значении ОСО. Стратосферный перенос, соответствующий этой аномалии, имеет северо-западное направление через область с высоким содержанием озона. Причина уменьшения содержания NO_2 не ясна. Возможно, что малое содержание NO_2 обусловлено наличием северной компоненты переноса с учетом того, что общее содержание NO_2 в это время года, согласно [9], обычно характеризуется уменьшением содержания к полюсу.

Как указывалось выше, метод измерения содержания NO_2 в Томске позволяет восстанавливать вертикальное распределение NO_2 . Интересно сопоставить, как это было сделано в [6] для Звенигорода, вертикальные профили NO_2 , соответствующие близким датам аномалий в 2010 и 2011 гг.

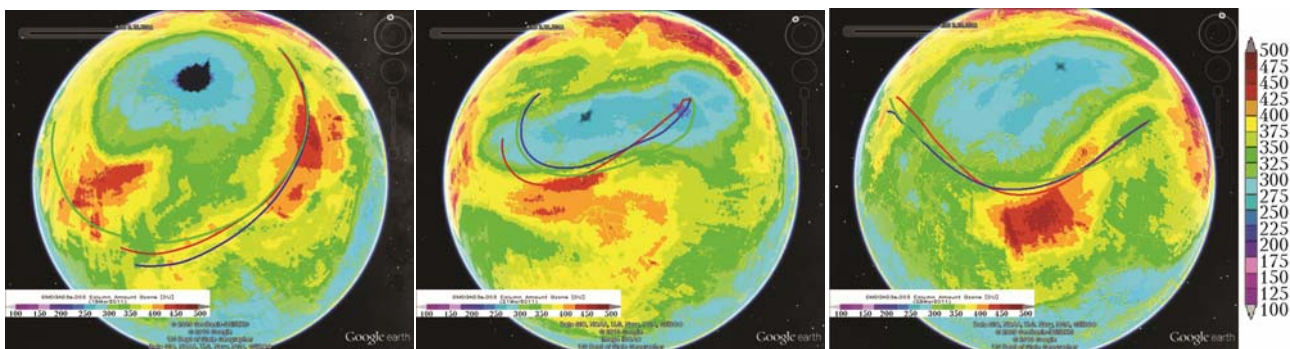
На рис. 5 приведены вертикальные профили NO_2 по результатам вечерних измерений в Томске. Кривые 1 соответствуют дням, предшествующим датам экстремумов аномалий 2010 г., кривые 3 соответствуют экстремумам аномалий 2010 г., а кривые 2 — экстремумам аномалий 2011 г. Концентрация NO_2 в слое высотного максимума NO_2 и в его окрестности во время январской и февральской аномалий 2011 г. значительно меньше, чем во время аномалий 2010 года, однако профили качественно подобны по форме (рис. 5, а, б). Различия в значениях концентрации NO_2 для профилей



а

б

в

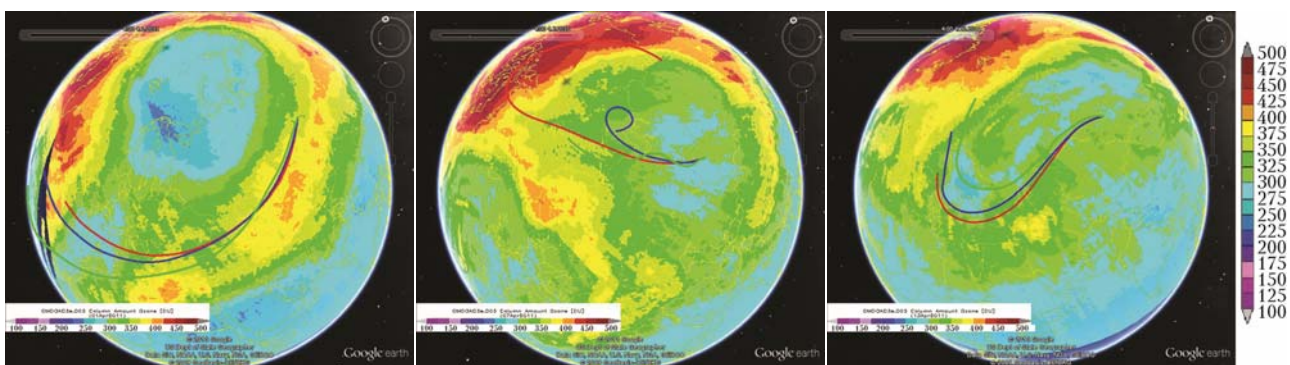


г

д

е

Рис. 3. Траектории переноса в точку с координатами Жиганска на высотах 20 (красная), 24 (синяя) и 30 (зеленая) км, наложенные на распределение ОСО



а

б

в

Рис. 4. Траектории переноса в точку с координатами Томска на высотах 20 (красная), 24 (синяя) и 30 (зеленая) км, наложенные на распределение ОСО

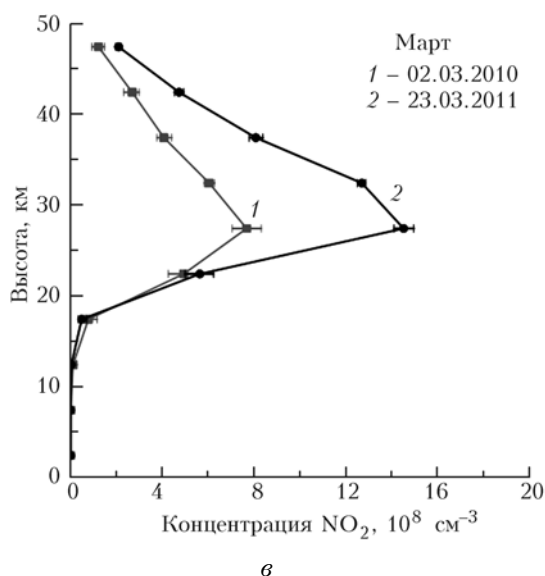
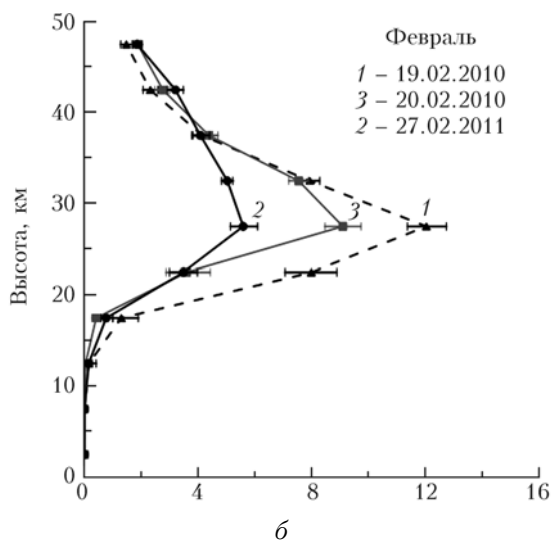
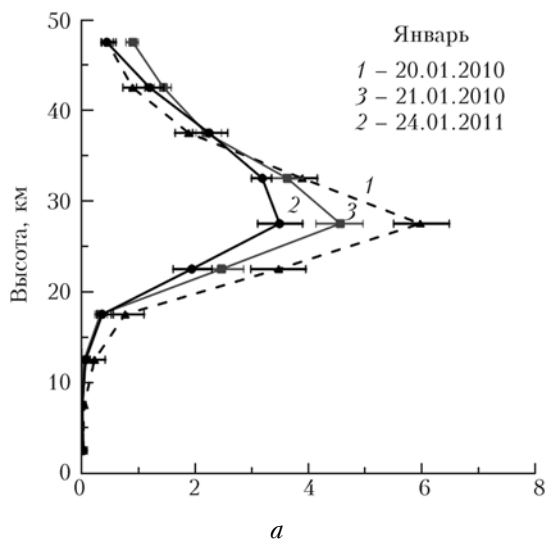


Рис. 5. Вертикальные профили NO_2 в Томске по вечерним измерениям 20 и 21 января 2010 г., 24 января 2011 г. (а); 19 и 20 февраля 2010 г., 27 февраля 2011 г. (б); 2 марта 2010 г. и 23 марта 2011 г. (в)

2 марта 2010 г. и 23 марта 2011 г. в слое максимума в значительной степени обусловлены годовым ходом с быстрым ростом стратосферного содержания NO_2 весной (рис. 5, в). Однако в профиле NO_2 за 23 марта 2011 г. можно отметить дефицит NO_2 в слое 17–25 км по сравнению с профилем за 2 марта 2010 г. Этот слой соответствует по высоте слою стратосферных полярных облаков и слою пониженных значений концентраций азотной кислоты в полярной области [2]. Поэтому можно предположить вслед за [6], что определенный вклад в отрицательную аномалию NO_2 23 марта 2011 г. внесла денитрификация полярной стратосферы в области озоновой дыры. Степень денитрификации усиливается со временем (при наличии необходимых условий), поэтому на ее ранних стадиях в январе–феврале 2011 г. она, вероятно, не проявилась в профилях NO_2 на рис. 5, а, б.

Заключение

По измерениям общего содержания NO_2 в Жиганске и Томске обнаружены значительные отрицательные аномалии содержания NO_2 в зимне-весенний период 2011 г. Отрицательные аномалии NO_2 в этот сезон наблюдались и в другие годы, но аномалии 2011 г. были рекордными. Дефицит общего содержания NO_2 в самой значительной аномалии 21 марта 2011 г. в Жиганске составил 60% по сравнению с типичными условиями. В Томске для аномалий 7 и 21 апреля 2011 г. он составил около 30%.

Отрицательные аномалии NO_2 в зимне-весенний период практически всегда сопровождалась отрицательными аномалиями ОСО, температуры и высот изобарических поверхностей в стратосфере.

Анализ траекторий стратосферного переноса и поля ОСО показал, что уменьшение стратосферного содержания NO_2 в зимне-весенние периоды вызвано переносом стратосферного воздуха из областей пониженного содержания озона, эволюция которых связана с эволюцией стратосферного циркулярного вихря. В условиях зимы–весны 2011 г., когда в Арктике разрушение стратосферного озона (озоновая дыра) было рекордным, уменьшение содержания NO_2 также оказалось рекордным. Анализ вертикальных профилей NO_2 в Томске показал, что это явилось, вероятно, результатом денитрификации полярной стратосферы в области арктической озоновой дыры.

Работа выполнена при финансовой поддержке программ РАН, Программы СО РАН (проект 4.5) и Минобрнауки (госконтракты № 14.518.11.7063, 11.519.11.6033, соглашение № 8325).

1. Solomon S. The mystery of the Antarctic ozone "Hole" // Rev. Geophys. 1988. V. 26, N 1. P. 131–148.
2. Manney G.L., Santee M.L., Rex M., Livesey N.J., Pitts M.C., Veefkind P., Nash E.R., Wohltmann I., Lehmann R., Froidevaux L., Poole L.R., Schoeberl M.R., Haffner D.P., Davies J., Dorokhov V., Gerndt H., Johnson B., Kivi R., Kyro E., Larsen N., Levelt P.F., Makhtas A., McElroy C.T., Nakajima H., Parrondo M.C., Tarasick D.W., von der Gathen P., Wal-

- ker K.A., Zinoviev N.S. Unprecedented Arctic ozone loss in 2011 // *Nature (Gr. Brit.)*. 2011. V. 478, N 7370. P. 469–475.
3. Balis D., Isaksen I.S.A., Zerefos C., Zyrichidou I., Eleftheratos I.K., Tourpali K., Bojkov R., Rognerud B., Stordal F., Sovde O.A., Orsolini Y. Observed and modelled record ozone decline over the Arctic during winter/spring 2011 // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. L23801. DOI: 10.1029/2011GL049259.
 4. Sinnhuber B.-M., Stiller G., Ruhnke R., von Clarmann T., Kellmann S., Aschmann J. Arctic winter 2010/2011 at the brink of an ozone hole // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. L24814. DOI: 10.1029/2011GL049784.
 5. Feng W., Chipperfield M.P., Davies S., Mann G.W., Carslaw K.S., Dhomse S., Harvey L., Randall C., Santee M.L. Modelling the effect of denitrification on polar ozone depletion for Arctic winter 2004/2005 // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11, N 13. P. 6559–6573.
 6. Груздев А.Н., Елохов А.Н. Отрицательная аномалия стратосферного содержания NO₂ над Звенигородом в конце марта – начале апреля 2011 г. // Докл. РАН. 2012. Т. 447, № 3. С. 326–330.
 7. Елохов А.С., Груздев А.Н. Измерения общего содержания и вертикального распределения NO₂ на Звенигородской научной станции // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2000. Т. 36, № 6. С. 831–846.
 8. Груздев А.Н., Елохов А.Н. Валидация результатов измерений содержания NO₂ в вертикальном столбе атмосферы с помощью прибора OMI с борта спутника EOS-Aura по данным наземных измерений на Звенигородской научной станции // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2009. Т. 45, № 4. С. 477–488.
 9. Груздев А.Н. Широтная зависимость вариаций стратосферного содержания NO₂ // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2008. Т. 44, № 3. С. 345–359.
 10. Gruzdev A.N. Latitudinal structure of variations and trends in stratospheric NO₂ // *Int. J. Remote Sens.* 2009. V. 30, N 15/16. P. 4227–4246.
 11. Груздев А.Н. О недельной цикличности в атмосфере // Докл. РАН. 2011. Т. 439, № 3. С. 407–412.

V. Yu. Ahejeva, M.V. Grishaev, A.N. Gruzdev, A.S. Elokhov, N.S. Salnikova. Anomalies of stratospheric NO₂ content over Siberia related to the Arctic ozone hole 2011.

At the end of winter and beginning of spring of 2011 significant negative anomalies of nitrogen dioxide were detected on the basis of results obtained from the ground-based spectrometric measurements of the stratospheric NO₂ content in Tomsk (West Siberia) and Zhigansk (East Siberia). Negative anomalies of NO₂ were observed in other years too, but in 2011 they were record. Negative anomalies of NO₂ were accompanied by anomalies of total ozone content (TOC), temperatures, and heights of the isobaric surfaces in stratosphere. The analysis of the transport atmospheric trajectories and horizontal TOC distribution demonstrated that the stratospheric NO₂ content decrease was caused by the transport of stratospheric air from low TOC area. Vertical NO₂ profiles in Tomsk show that, most probably, some contribution to the negative anomalies in the early spring of 2011 brought by denitrification of the polar stratosphere in ozone hole area.