

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551.510.534+551.21

О роли извержения вулкана Мерапи в аномальном понижении ОСО над Томском в апреле 2011 г.

В.В. Зуев^{1,2,3}, Н.Е. Зуева¹, Е.С. Савельева¹, О.Е. Баженов⁴, А.В. Невзоров^{4*}

¹ *Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3*

² *Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36*

³ *Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30*

⁴ *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 29.09.2015 г.

В апреле 2011 г. в средних широтах Северного полушария над рядом областей регистрировалось длительное аномальное понижение общего содержания озона, которое связывают с отголосками масштабной арктической озоновой аномалии, наблюдавшейся в марте. Показано, что разрушение стратосферного озона над Томском в этот период обусловлено извержением индонезийского вулкана Мерапи в ноябре 2010 г. Представлены результаты анализа движения воздушных масс в нижней стратосфере от координат вулканического выброса с момента извержения до конца апреля, выполненного с использованием модели NOAA HYSPPLIT. Установлено, что воздушные массы, содержащие вулканогенный аэрозоль, пришли в средние широты Северного полушария в конце марта 2011 г., что согласуется с регистрацией в стратосфере над Томском высокого содержания аэрозоля в этот период. На основе анализа температурных и озоновых аномалий в стратосфере над Томском показано, что их появление обусловлено наличием в составе аэрозоля вулканогенной сажи.

Ключевые слова: извержение влк. Мерапи, вулканогенный сажевый аэрозоль, озоновые аномалии; eruption of Merapi volcano, volcanic soot aerosol, ozone anomalies.

Введение

В марте 2011 г. в стратосфере над Арктикой образовалась масштабная озоновая аномалия, крупнейшая за 35-летний период инструментальных наблюдений в Северном полушарии [1–3]. Вслед за этим в конце марта и в апреле в разных областях Западной Европы и Сибири наблюдалось аномальное понижение общего содержания озона (ОСО), в том числе в Томске [4–7]. На рис. 1 приведен временной ход ОСО над Томском по данным УФ-радиометра NILU-UV-6T за март–апрель 2011 г. Видно, что аномально низкие для этого периода значения ОСО регистрировались фактически 20 дней (с 5 по 25 апреля 2011 г.).

В статьях [4–7] понижение ОСО в средних широтах в этот период трактуется как отголосок арктической озоновой аномалии, проявившийся в выносе в эти области обедненных озоном воздушных масс при разрушении арктического циркумпо-

лярного вихря. Однако такая интерпретация не позволяет объяснить длительный период (около 3 нед) озоновой аномалии, поскольку за счет притока озона по циркуляции Брюера–Добсона и усиления в апреле его фотохимического образования ОСО должно было достаточно быстро восстановиться. Следовательно, в марте–апреле 2011 г. в регионах средних широт Северного полушария появился иной фактор разрушения стратосферного озона.

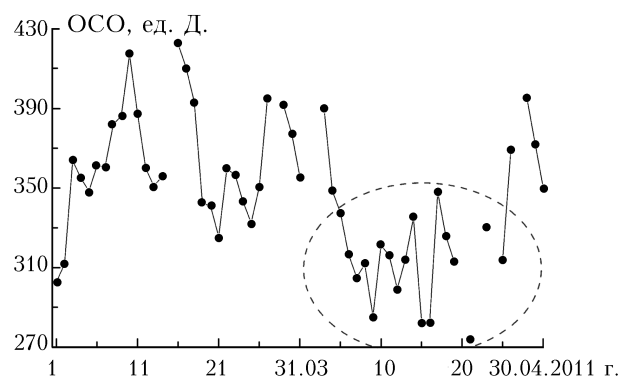


Рис. 1. Среднесуточный ход ОСО над Томском с марта по апрель 2011 г.

* Владимир Владимирович Зуев (vvzuev@imces.ru);
Нина Евгеньевна Зуева (vzuev@list.ru); Екатерина Сергеевна Савельева (kapitosh89@gmail.com); Олег Елисеевич Баженов (boe@iao.ru); Алексей Викторович Невзоров (nevzorov@iao.ru).

Известно, что разрушение стратосферного озона, в частности, происходит после крупных вулканических извержений, способных забросить продукты в стратосферу [8, 9]. Наиболее продолжительная озоновая депрессия наблюдается после извержений тропических вулканов. Образующиеся после извержения аэрозольные облака курсируют в тропической стратосфере, а также подхватываются воздушными потоками с сильной меридиональной составляющей в зимнем полушарии и переносятся с уклоном к полюсу. За счет интенсивного разрушения озона в гетерогенных реакциях на поверхности вулканогенного аэрозоля по мере перемещения вулканических облаков формируются локальные озоновые аномалии. При этом перемещение аэрозольных слоев может быть значительно растянуто по времени, что определяет длительность озоновых аномалий.

В период с 3 по 8 ноября 2010 г., фактически за 5 мес до регистрации аномального понижения ОСО в средних широтах Северного полушария, произошло извержение индонезийского вулкана Мерапи (7,5° ю.ш., 110,4° в.д.), характеризующееся индексом вулканической эксплозивности VEI 4. В настоящей статье представлена схема наиболее вероятного появления продуктов извержения влк. Мерапи в стратосфере средних широт Северного полушария, проанализировано влияние вулканогенного

аэрозоля на разрушение стратосферного озона и разогрев стратосферы над Томском в апреле 2011 г.

Перенос вулканогенного аэрозоля в средние широты Северного полушария

При извержении влк. Мерапи 4 ноября 2010 г. в 17:05 (UTC) высота эруптивной колонны достигла 18,3 км [10, 11] при высоте тропопаузы около 16,3 км [12]. Траекторный анализ движения воздушных масс в нижней стратосфере, проведенный с использованием модели NOAA HYSPLIT [13], от даты извержения и координат вулкана, показал, что основная часть выброса влк. Мерапи сохранялась в тропической стратосфере более полугода после извержения. Однако при старте от высоты 17,5 км расчетная траектория движения воздушных масс постепенно стягивалась в северном направлении.

На рис. 2 показана траектория движения стратосферных воздушных масс, рассчитанная на основе архивных данных NOAA GDAS (1-degree) от координат влк. Мерапи (отмечен звездочкой) и высоты 17,5 км от момента извержения 4 ноября 2010 г. до конца апреля. Воздушные массы, содержащие вулканогенный аэрозоль, достигли средних широт Северного полушария в конце марта 2011 г., а 16 апреля 2011 г. они прошли над Томском

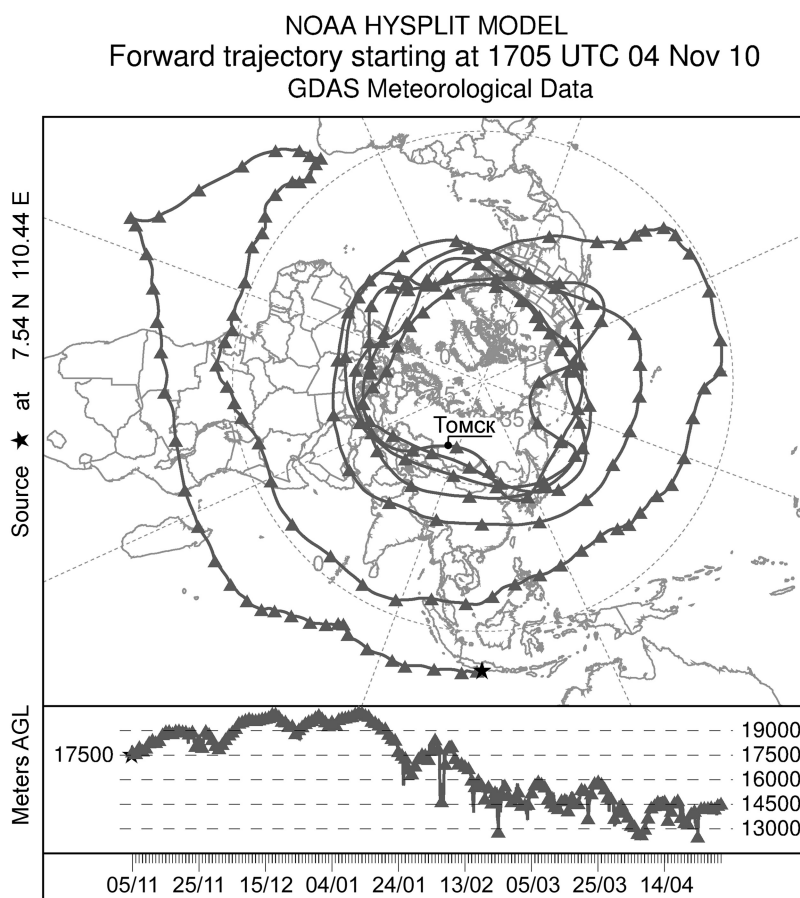


Рис. 2. Рассчитанная по модели NOAA HYSPLIT траектория перемещения воздушных масс от координат влк. Мерапи и высоты 17,5 км от 4 ноября 2010 г.

(56,5° с.ш., 84,9° в.д.). На рис. 2 видно, что траектория их движения неоднократно проходила над районами Западной Европы, где регистрировалось значительное разрушение стратосферного озона [4].

Результаты траекторного анализа согласуются с данными лидарных наблюдений стратосферного аэрозоля. На рис. 3 приведены профили отношения рассеяния $R(H)$ (отношение суммы коэффициентов обратного аэрозольного и молекулярного рассеяния к коэффициенту обратного молекулярного рассеяния на длине волны 532 нм), характеризующие высотное распределение аэрозольного содержания над Томском от 4 марта и 18 апреля (в связи с отсутствием данных за 16 апреля). Профиль $R(H)$ от 4 марта 2011 г. представляет собой типичное высотное распределение фоновое стратосферного аэрозоля над Томском. Однако профиль $R(H)$ от 18 апреля с выраженными аэрозольными слоями указывает на значительное повышение аэрозольного наполнения стратосферы до высоты 20 км, характерное для всех эпизодов лидарной регистрации вулкано-генных аэрозолей в стратосфере над Томском после мощных извержений тропических вулканов [14, 15].

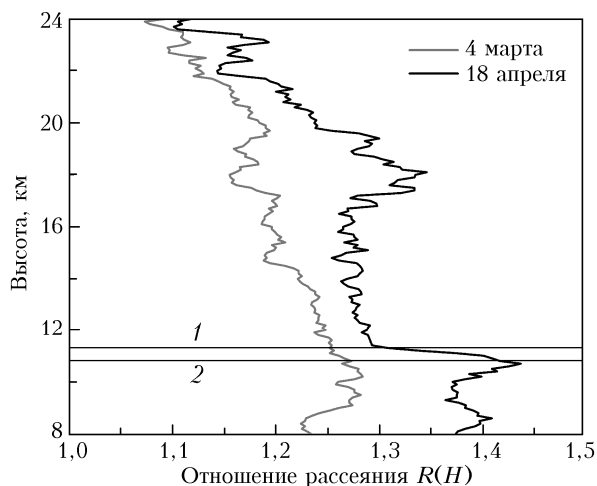


Рис. 3. Профили отношения рассеяния $R(H)$, полученные на длине волны 532 нм 4 марта и 18 апреля 2011 г. над Томском. 1 — высота тропопаузы 4 марта; 2 — высота тропопаузы 18 апреля

Таким образом, фактически в период, согласующийся с оценками траекторной модели NOAA HYSPLIT, профиль $R(H)$ от 18 апреля отражает наличие в стратосфере над Томском вулкано-генного аэрозоля, попавшего в стратосферу при извержении влк. Мерапи. Следует отметить, что в данном случае несовпадение по датам на 2 дня является принципиальным с учетом погрешностей анализа траекторного движения воздушных масс для столь длительного (около полугода) периода.

Сопоставление результатов траекторного анализа и данных лидарных измерений для Томска дает основание полагать, что разрушение стратосферного озона, регистрировавшееся над другими регионами средних широт Северного полушария в марте—апреле 2011 г., прежде всего обусловлено прохождением вулкано-генных облаков, сформировавшихся в стратосфере после извержения влк. Мерапи.

Состав вулкано-генного аэрозоля и его роль в формировании температурных и озоновых аномалий в стратосфере над Томском

Преобладающими компонентами в составе вулкано-генного выброса среди твердых частиц является пепел, а среди газов — водяной пар и диоксид серы SO_2 . Пепел, в зависимости от минерального состава представляющий собой твердые частицы размерами от 1 до 2 мм и плотностью от 700 до 3300 кг/м³, может играть значимую роль в процессе разрушения стратосферного озона [16]. Как правило, основное количество пепла состоит из диоксида кремния SiO_2 (> 50%) и оксида алюминия Al_2O_3 (около 20%) [17]. Поскольку Al_2O_3 характеризуется высокой константой взаимодействия с озоном $\gamma = 1,2 \cdot 10^{-4}$ [18], присутствие в составе вулкано-генных облаков пепловых частиц оксида алюминия играет значимую роль в разрушении стратосферного озона. Помимо пепла важным компонентом вулкано-генного выброса, участвующим в образовании озоновых аномалий, является нанодисперсный сажевый аэрозоль [19–21], для которого константа взаимодействия с озоном $\gamma = 2 \cdot 10^{-3}$ [22].

Основная часть SO_2 в течение 1–2 нед окисляется до сернокислотного аэрозоля, средний радиус r частиц которого со временем увеличивается вследствие их коагуляции примерно от 0,15 до 0,55 мкм [23]. Для сернокислотного аэрозоля, особенно для укрупненных частиц, характерны крайне низкие значения константы взаимодействия с озоном (в условиях стратосферы коэффициент accommodations $\alpha < 10^{-8}$ [24, 25]), поэтому его роль в разрушении стратосферного озона не может быть значимой.

Время жизни вулкано-генного аэрозоля в стратосфере можно оценить по скорости его седиментации, рассчитанной по формуле [26]:

$$u = \frac{2\sqrt{\pi}r\rho g \sqrt{\frac{2RT}{M}}}{(8 + \pi)P \frac{\text{Kn}}{\text{Kn} + 0,619} \left(1 + \frac{0,310\text{Kn}}{\text{Kn}^2 + 1,152\text{Kn} + 0,785}\right)}, \quad (1)$$

где r — радиус частиц; ρ — плотность частиц; g — ускорение свободного падения; R — универсальная газовая постоянная; T — температура на заданной высоте; M — молярная масса воздуха; P — давление на заданной высоте; Kn — число Кнудсена;

$$\text{Kn} = \frac{\lambda_m}{r} = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 r P}. \quad (2)$$

Здесь λ_m — средняя длина свободного пробега молекул воздуха; k — постоянная Больцмана; d — эффективный диаметр молекул воздуха.

После извержения влк. Мерапи вулкано-генный аэрозоль находился в стратосфере тропической зоны около 3 мес (см. рис. 2). Поэтому при вычислении скорости седиментации значения температуры определялись в соответствии с 30-летним средним температурным профилем над станцией Hilo (19,7° с.ш., 155,1° з.д.), который, по сути, отража-

ет изменение температуры с высотой в тропических широтах. Величина давления рассчитывалась по барометрической формуле. В расчетах учитывался подъем траектории до высоты 19,5 км. Оценки, проведенные с помощью формулы (1), показали, что основная часть пепла была выведена из стратосферы через 1,5–2 мес благодаря гравитационному осаждению. Таким образом, вулканогенные аэрозольные слои, зарегистрированные в стратосфере над Томском в апреле 2011 г. (см. рис. 3), вероятнее всего, состояли, главным образом, из частиц сажевого и сернокислотного аэрозоля.

Индикатором присутствия этих частиц в стратосфере может служить ее временный разогрев. Частицы сажи можно рассматривать как абсолютно черное тело, что позволяет им активно участвовать в радиационном нагреве стратосферного воздуха. Сернокислотный аэрозоль имеет полосы поглощения в тепловом ИК-диапазоне спектра. Поглощая восходящую с поверхности Земли длинноволновую радиацию, он также способен нагреть окружающий его стратосферный воздух. По сути, температурные эффекты сажевого и сернокислотного аэрозоля суммируются.

Поскольку шар-зондовые измерения над Томском не проводятся, для анализа были использованы температурные профили апреля 2011 г., построенные по данным, представленным на сайте Университета Вайоминга [12], для метеостанции г. Новосибирска (55,0° с.ш., 82,9° в.д.). Достаточно близкое расположение городов Новосибирска и Томска позволяет говорить об общности процессов, протекающих в стратосфере над ними. Выраженное потепление нижней стратосферы над Новосибирском начало формироваться 7 апреля и 18 апреля достигло максимума. На рис. 4 приведены температурные профили на 6, 7 и 18 апреля 2011 г.

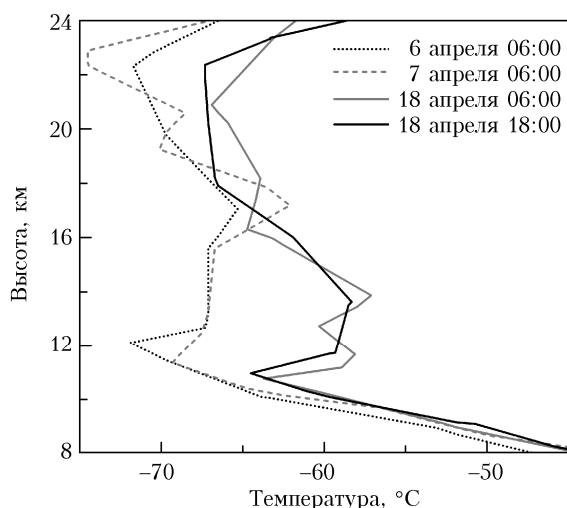


Рис. 4. Температурные профили над Новосибирском на 6, 7 и 18 апреля 2011 г. (время в легенде соответствует местному — UTC+6)

Видно, что основное потепление наблюдалось в высотном диапазоне от 10 до 16 км, где рост температуры составил около 10 °C. Фактически в этот же период (15 и 16 апреля) регистрировались аномально низкие значения ОСО над Томском (см. рис. 1).

Поскольку в эти сутки лидарные измерения в Томске не проводились, аэрозольные слои в стратосфере над Томском 18 апреля (см. рис. 3), вероятно, были зарегистрированы при прохождении не основной, а задней периферийной части вулканогенного облака. Основываясь на географии озоновых аномалий, наблюдавшихся в марте–апреле 2011 г. в Западной Европе и Сибири, можно утверждать, что перемещающиеся из тропической стратосферы аэрозольные слои, содержащие нанодисперсные частицы вулканогенного сажевого и сернокислотного аэрозоля, охватывали достаточно большие территории.

Заключение

Извержение индонезийского вулкана Мерапи, произошедшее в ноябре 2010 г., стало причиной глобального возмущения стратосферного аэрозольного слоя. Анализ движения воздушных масс, проведенный с использованием траекторной модели NOAA HYSPLIT, показал, что вулканогенный аэрозоль достиг среднеширотной стратосферы Северного полушария к концу марта 2011 г., т.е. фактически через 5 мес после извержения. Оценки скорости гравитационного оседания пепельных частиц показали, что за это время воздушные массы почти полностью освободились от пепла. Удовлетворительное пространственное и временное совпадение результатов траекторного анализа с данными наблюдений аэрозольных, температурных и озоновых аномалий в стратосфере над Томском свидетельствует о появлении в средних широтах аэрозольных облаков, содержащих вулканогенную сажу. Характерными свойствами сажи являются высокая эффективность поглощения солнечной и тепловой радиации, обеспечивающая разогрев стратосферного воздуха, способность активно разрушать озон в ходе гетерогенных реакций и длительное время жизни в стратосфере. Данные мониторинга показали, что в разных областях средних широт Северного полушария, охваченных траекторией перемещения аэрозольных облаков, в апреле 2011 г. в течение длительного времени регистрировалось аномальное разрушение озона, наиболее вероятной причиной которого стало наличие нанодисперсного сажевого аэрозоля, попавшего в стратосферу при извержении влк. Мерапи.

Авторы выражают благодарность к.ф.-м.н. С.В. Смирнову за любезно предоставленные данные наблюдений ОСО в Томске, полученные с помощью УФ-радиометра NILU-UV-6T в марте–апреле 2011 г.

1. 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., Gerandt H., Johnson B., Kivi R., Kyro E., Larsen N., Levelt P.F., Makshtas A., McElroy C.T., Nakajima H., Parrondo M.C., Tarasick D.W., von der Gathen P., Walker K.A., Zinoviev N.S. Unprecedented Arctic ozone loss in 2011 // *Nature (Gr. Brit.)*. 2011. V. 478, N 7370. P. 469–475.
2. Kuttippurath J., Godin-Beekmann S., Lefevre F., Nikulin G., Santee M.L., Froidevaux L. Record-breaking

- ozone loss in the Arctic winter 2010/2011: Comparison with 1996/1997 // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12, N 15. P. 7073–7085.
3. Balis D., Isaksen I.S.A., Zerefos C., Zyrichidou I., Eleftheratos K., Tourpali K., Bojkov R., Rognerud B., Stordal F., Swede O.A., Orsolini Y. Observed and modelled record ozone decline over the Arctic during winter/spring 2011 // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38, N 23. P. L23801.
 4. Petkov B.H., Vitale V., Tomasi C., Siani A.M., Seckmeyer G., Webb A.R., Smedley A.R.D., Casale G.R., Werner R., Lanconelli C., Mazzola M., Lupi A., Busetto M., Diemoz H., Goutail F., Köhler U., Mende-va B.D., Josefsson W., Moore D., Bartolome M.L., Gonzalez J.R.M., Misagam O., Dahlback A., Toth Z., Varghese S., Backer H.D., Stübi R., Vanicek K. Response of the ozone column over Europe to the 2011 Arctic ozone depletion event according to ground-based observations and assessment of the consequent variations in surface UV irradiance // *Atmos. Environ.* 2014. V. 85. P. 169–178.
 5. Dorokhov V., Tsvetkova N., Yushkov V., Nakajima H., Ivlev G., Makshtas A., Tereb N., Goutail F., Pazmino A., Pommereau J.-P. Arctic ozone loss in Siberia in 2011 and 2012 // *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* 2013. V. 6, N 2. P. 2955–2978.
 6. Баженов О.Е., Бурлаков В.Д. Аномальное понижение уровня общего содержания озона над Томском и северной территорией России в марте–апреле 2011 г. // *Оптика атмосф. и океана.* 2011. Т. 24, № 10. С. 915–919.
 7. Баженов О.Е. Оценка влияния влажности и температуры в стратосфере на возникновение озоновой аномалии весной 2011 г. в Арктике и над северной территорией России // *Оптика атмосф. и океана.* 2012. Т. 25, № 7. С. 589–593.
 8. Зуев В.В. Вулканы и озоновый слой // *НАУКА из первых рук.* 2010. Т. 34, № 4. С. 68–75.
 9. Зуев В.В., Зуева Н.Е. Вулканогенные возмущения стратосферы – главный регулятор долговременного поведения озоносферы в период с 1979 по 2008 г. // *Оптика атмосф. и океана.* 2011. Т. 24, № 1. С. 30–34.
 10. GVP (Global Volcanism Program). Merapi Weekly Reports, 2010. Smithsonian National Museum of Natural History. URL: <http://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=263250#November2010>
 11. Surono P.J., Pallister J., Boichu M., Buongiorno M.F., Budisantoso A., Costa F., Andrestuti S., Prata F., Schneider D., Clarisse L., Humaida H., Sumarti S., Bignami C., Griswold J., Carn S., Oppenheimer C., Lavigne F. The 2010 explosive eruption of Java's Merapi volcano – A '100-year' event // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2012. V. 241–242. P. 121–135.
 12. University of Wyoming. College of Engineering. Department of Atmospheric Science. Soundings. URL: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
 13. Draxler R.R., Hess G.D. An overview of the HYSPLIT_4 modeling system for trajectories, dispersion, and deposition // *Aust. Meteorol. Mag.* 1998. V. 47, N 1. P. 295–308.
 14. Зуев В.В., Баженов О.Е., Бурлаков В.Д., Гришаев М.В., Долгий С.И., Невзоров А.В. О влиянии вулканогенного аэрозоля на изменения стратосферного озона и NO₂ по данным измерений на Сибирской лидарной станции // *Оптика атмосф. и океана.* 2008. Т. 21, № 11. С. 945–951.
 15. Зуев В.В., Балин Ю.С., Букин О.А., Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Кабашиников В.П., Невзоров А.В., Осипенко Ф.П., Павлов А.Н., Пеннер И.Э., Самойлова С.В., Столярчук С.Ю., Чайковский А.П., Шмидко К.А. Результаты совместных лидарных наблюдений аэрозольных возмущений стратосферы на станции сети CIS-LiNet в 2008 г. // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22, № 5. С. 450–456.
 16. USGS Volcano Hazards Program Site. Ash properties & dispersal by wind. URL: <http://volcanoes.usgs.gov/ash/properties.html>
 17. Patterson E.M., Pollard C.O., Galindo I. Optical properties of the ash from El Chichon volcano // *Geophys. Res. Lett.* 1983. V. 10, N 4. P. 317–320.
 18. Michel A.E., Usher C.R., Grassian V.H. Reactive uptake of ozone on mineral oxides and mineral dusts // *Atmos. Environ.* 2003. V. 37, N 23. P. 3201–3211.
 19. Зуев В.В., Зуева Н.Е., Савельева Е.С. Вулканогенный фактор усиления стратосферно-тропосферного обмена // *Оптика атмосф. и океана.* 2013. Т. 26, № 12. С. 1068–1072.
 20. Зуев В.В., Зуева Н.Е., Куценогий П.К., Савельева Е.С. Вулканогенный нанодисперсный углеродный аэрозоль в стратосфере // *Химия в интересах устойчивого развития.* 2014. Т. 22, № 1. С. 83–88.
 21. Зуев В.В., Зуева Н.Е., Савельева Е.С. Температурные и озоновые аномалии как индикаторы вулканогенной сажи в стратосфере // *Оптика атмосф. и океана.* 2014. Т. 27, № 8. С. 698–704.
 22. Bekki S. On the possible role of aircraft-generated soot in the middle latitude ozone depletion // *J. Geophys. Res. D.* 1997. V. 102, N 9. P. 10751–10758.
 23. Russell P.B., Livingston J.M., Pueschel R.F., Bauman J.J., Pollack J.B., Brooks S.L., Hamill P., Thomson L.W., Stowe L.L., Deshler T., Dutton E.G., Bergstrom R.W. Global to microscale evolution of the Pinatubo volcanic aerosol derived from diverse measurements and analyses // *J. Geophys. Res. D.* 1996. V. 101, N 13. P. 18745–18763.
 24. Harker A.B., Ho W.W. Heterogeneous ozone decomposition on sulfuric acid surfaces at stratospheric temperatures // *Atmos. Environ.* 1979. V. 13, N 7. P. 1005–1010.
 25. Olszyna K., Cadle R.D., DePena R.G. Stratospheric heterogeneous decomposition of ozone // *J. Geophys. Res. C.* 1979. V. 84, N 4. P. 1771–1775.
 26. Грязин В.И. Вертикальный перенос стратосферных аэрозолей в поле ветра: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Екатеринбург: Урал. гос. ун-т им. А.М. Горького. Екатеринбург, 2011. 24 с.

V.V. Zuev, N.E. Zueva, E.S. Savelieva, O.E. Bazhenov, A.V. Nevzorov. **On the role of eruption of Merapi volcano in anomalous total ozone decrease over Tomsk in April, 2011.**

In April, 2011, at Northern Hemisphere midlatitudes, a long-term anomalous decrease of the total ozone content was recorded over a number of regions, attributed to echoes of large-scale Arctic ozone anomaly, observed in March. In this paper, we showed that stratospheric ozone destruction over Tomsk during that period was caused by eruption of Indonesian volcano Merapi in November 2010. NOAA HYSPLIT model was used to analyze the motion of air masses in the lower stratosphere on the way from coordinates of volcanic ejection from the moment of eruption until late April. It was found that air masses, containing volcanic aerosol, came to the Northern Hemisphere midlatitudes in late March 2011, in agreement with high aerosol content recorded in the stratosphere over Tomsk during that period. Based on analysis of temperature and ozone anomalies in the stratosphere over Tomsk, we showed that they manifested themselves by the volcanic soot present in aerosol composition.