УДК 551.556.4

ПЕРЕНОС СТРАТОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ ВУЛКАНИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ НАД ЗАПАДНОЙ СИБИРЬЮ В 2008-2017 ГОДАХ СОГЛАСНО ДАННЫМ ТРАЕКТОРНОГО АНАЛИЗА И ЛИДАРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ*

**А. А. Черемисин¹, В. Н. Маричев², П. В. Новиков³,
Д. А. Бочковский²**

¹ Институт химической кинетики и горения им. В.В.Воеводского СО РАН, 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3

² Институт оптики атмосферы им. В.Е.Зуева СО РАН, 634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1.

³ Красноярский институт железнодорожного транспорта, Красноярск, 660028, Россия, г. Красноярск, ул. Ладо Кецховели, 89

E-mail: aacheremisin@gmail.com, marichev@iao.ru, novikov-pv@yandex.ru, moto@iao.ru

В течение десятилетнего периода с 2008 по 2019 год проводились лидарные наблюдения стратосферного аэрозоля в Томске на станции высотного зондирования ИОА СО РАН. За этот период удалось зарегистрировать слои вулканического аэрозоля, возникшего в результате извержения целого ряда вулканов. Метод лагранжевых траекторий движения воздушных масс в атмосфере, построенных по данным спутниковых измерений скорости ветра в Северном полушарии, позволил связать между собой данные лидарных наземных наблюдений верхней тропосферы и стратосферы в Томске и Владивостоке, данные космического лидара CALIOP и спутниковую информацию с прибора GOME-2 о распределении диоксида серы в атмосфере Северного полушария. В данной работе это показано на примере извержения вулканов Касаточи и Набро.

Ключевые слова: траектории воздушных масс, аэрозоль, вулканы, стратосфера, лидар

© Черемисин А. А. и др., 2019

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №19-45-700008 и гранта президента МК-4592.2018.8.

Введение

В течение десятилетнего периода с 2008 по 2019 год проводились лидарные наблюдения стратосферного аэрозоля в Томске на станции высотного зондирования ИОА СО РАН. Измерения были выполнены методом упругого рассеяния на длине волны 532 нм. Для приема сигнала использовался телескоп системы Ньютона с диаметром главного зеркала один метр и высокочувствительные фотоприемные устройства, работающие в режиме счета фотонов.

За этот период удалось зарегистрировать слои вулканического аэрозоля, возникшего при извержениях вулканов Касаточи, Окмок и Кливленд в 2008 году, Сарычев в 2009, Эйяфьядлайёкюдль в 2010, Гримсвотн и Набро в 2011, Шивелуч в 2017 и других.

Происхождение наблюдавшихся слоистых структур анализировалось с помощью метода лагранжевых траекторий движения воздушных масс в атмосфере, которые были построены по данным спутниковых измерений скорости ветра в Северном полушарии. Были рассчитаны изоэнтропийные траектории воздушных масс, начальные точки которых располагались на различных высотах над вулканами в моменты их извержений. Траектории были получены с помощью разработанного нами пакета компьютерных программ с использованием ассимилированных данных UK MetOffice по скоростям ветра в Северном полушарии, а также с помощью пакета HYSPLIT по данным GDAS. Используемая методика показала хорошие результаты не только при исследовании происхождения вулканического аэрозоля [1]- [2], но и при изучении полярных стратосферных облаков, которые наблюдались над Томском [3]- [4], а также при анализе аэрозоля, возникшего в результате падения челябинского метеорита [5].

Траекторный анализ и лидарные наблюдения позволяют выявить как индивидуальные отличия, так и некие общие черты формирования эруптивных облаков над Западной Сибирью. Далее будут представлены результаты такого анализа на примере извержений двух удаленных в широтном измерении вулканов.

Результаты исследования

Начнем с исследования аэрозоля, возникшего при извержениях вулканов на средних широтах.

В августе 2008 года в Томске проводились лидарные наблюдения атмосферы на высотах от 5 до 30 км, в результате которых были зарегистрированы аэрозольные слои.

При извержении 7–8 августа 2008 года вулкан Касаточи выбросил в атмосферу огромное количество диоксида серы, распространение которого регистрировалось спутниками приборами OMI и GOME-2 вплоть до первой декады сентября [6]. Данные этих приборов отражают суммарное по всем высотам содержание SO_2 , и были использованы нами в качестве инструмента для анализа качества расчетов траекторий воздушных масс.

Мы провели моделирование динамической картины распространения пятен загрязнения атмосферы диоксидом серы методом прямых траекторий. Для этого были рассчитаны наборы траекторий, начинающиеся в моменты каждого из извержений Касаточи. на высотах от 6 до 17 км (рис.1).

Рис. 1. а) профили вертикального распределения аэрозоля над Томском 16 и 22 августа 2008 года; б) суточные сегменты траекторий и распределение диоксида серы на 16 августа; в) то же на 22 августа 2008 года. Траектории начаты от моментов трех извержений вулкана Касаточи. Области серого цвета соответствуют общему содержанию диоксида серы более 1 ед. Добсона по данным [6]

На рис.1б, 1с приведены суточные отрезки траекторий, рассчитанных по данным BADС, на 16 и 22 августа, в сравнении с распределением диоксида серы по данным прибора GOME-2 [6]. Возле групп траекторий приведены их примерные высоты.

На рис.1 видно, что 16 августа, через 8 суток после извержения Касаточи, наблюдается удовлетворительное качественное совпадение картины суточных отрезков траекторий с распределением диоксида серы. 16 августа около 5:00 UTC зона высокой концентрации SO_2 прошла вблизи Томска, причём с этой зоной совпали несколько траекторий на высоте 8-9 км.

Таким образом, наблюдаемые с помощью лидаров пики аэрозольного рассеяния на тех же высотах в это же время над Томском (рис.1а) можно интерпретировать как имеющие вулканическое происхождение.

Через 14 суток после извержения Касаточи, 22 августа, непосредственно над Томском находилось достаточно плотное пятно диоксида серы. На это пятно легло довольно много траекторий на высотах 11-12 км, а по лидарным данным в этот день наблюдался пик аэрозольного рассеяния на высоте 8-12 км с существенно большей интенсивностью, чем 16 августа (рис.1а). Вследствие этого, достаточно уверенно можно утверждать, что в этот день в Томске наблюдался вулканический аэрозоль.

Также были рассчитаны прямые траектории движения воздушных масс от вулкана Касаточи с теми же начальными условиями с помощью программного пакета

HYSPLIT, использующего набор данных GDAS. Результаты расчетов дали похожую картину суточных отрезков траекторий.

Рассмотрим теперь последствия извержения вулкана в экваториальной зоне. Исследование аэрозольных выбросов в стратосферу в этой зоне имеет особый интерес в связи с тем, что, как известно, именно там находится так называемый стратосферный аэрозольный резервуар. Причины образования этого резервуара фактически неизвестны, и требуется накопление экспериментальных данных для их выявления. Одна из гипотез формирования резервуара заключается в фотофоретической поддержке аэрозольных частиц в стратосфере экваториальной зоны [7]. Итак, в 2011 году произошло очередное извержение вулкана Набро, 13 июня в Эритрее, Северо-восток Африки. Исследования этого явления были осложнены тем обстоятельством, что близко по времени произошло извержение второго вулкана-вулкана Гримсвотн, 21 мая в Исландии. Извержение Гримсвотн вызвало загрязнение приповерхностного слоя атмосферы в Северной Европе, Южной Финляндии, Хельсинки [8], и Эстонии, Вильнюс [9]. Привлекающей внимание особенностью распространения вулканических продуктов в атмосфере было разделение пепельных облаков и шлейфа диоксида серы вскоре после извержения. Высота пепельного шлейфа над Вильнюсом, согласно траекторному анализу, достигала 3-4,5 км. Но, оказалось, что выделить вулканическую составляющую от вулкана Гримсвотн в аэрозольном наполнении над Томском по лидарным данным, на фоне уже имеющегося аэрозольного наполнения, не представилось возможным.

С точки зрения атмосферных исследований, наибольший интерес вызвало извержение вулкана Набро. По оценке Bourassa et al. [10] на основе спутниковых данных, извержение этого вулкана оказало наибольшее влияние на аэрозольное наполнение стратосферы по сравнению с извержениями других вулканов в 2005-2011 гг. Кроме того, возникла проблема с пониманием того, как при извержении Набро аэрозоль появился в стратосфере – выброс продуктов извержения произошел прямо в стратосферу или был занесен туда за счет конвективного переноса над областью Азиатского летнего муссона, имеющего антициклонический характер циркуляции воздуха.

По данным службы VAAC в Тулузе, 13 июня в 6 часов UTC были зафиксированы выбросы вулканического пепла только до высот 9-14 км. Далее в течение 13 и 14 июня пепел просел до высот 6-11 км. Выбросы были ниже высот тропической тропопаузы, которая была стабильной и типично располагалась между 16 и 18 км. Согласно анализу результатов спутниковых наблюдений аэрозольного наполнения стратосферы, в первую очередь – это данные OSIRIS (Optical Spectrograph and Infra-Red Imaging System), Bourassa et al. [10] предположили, что шлейф от Набро первоначально поднялся до высот 10-13 км, а затем был поднят на стратосферные высоты за счет глубокой конвекции Азиатским летним муссоном.

С другой точки зрения, на основании других спутниковых данных, в том числе полученных с помощью космического лидара CALIPSO [11], который спустя трое суток после начала извержения зарегистрировал аэрозоль на высоте 18,5 км над Азией, высказано мнение, что первоначально продукты извержения Набро были заброшены прямо в нижнюю стратосферу [12]- [13]. Далее дискуссия была продолжена, но вопрос о механизме переноса продуктов извержения в стратосферу остался открытым до сих пор [14]. В частности, на основе использования новых алгоритмов восстановления высотного распределения диоксида серы для спутникового прибора IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer), представлены данные, что первоначально продукты извержения Набро были в основном инжектированы на вы-

соты между 15 и 17 км [15], т.е. на бóльшие высоты, чем ранее предполагалось Bourassa et al. [10]. Для анализа аэрозольного наполнения после извержения вулкана Набро привлекались также данные наземных лидаров, находящихся, например, во Франции, обсерватория de Hante-Providence [16], Израиле, Sede Boker [17], и Китае, Wihan [18].

Далее мы представляем наши расчеты для распространения воздушных масс после извержения вулкана Набро, используя оригинальную методику и данные по скорости ветра UK MetOffice. Мы рассчитали траектории длительностью до месяца, что позволило интерпретировать ряд аэрозольных пиков, наблюдавшихся с помощью лидаров в Томске и Владивостоке, как вулканический аэрозоль от Набро (рис.2).

Рис. 2. а) профиль вертикального распределения аэрозоля над Владивостоком 20 июня 2011 года; б) траектории и суточные сегменты траекторий от вулкана Набро, прошедшие на высоте 16 км над Владивостоком 20 июня 2011 года и над Томском 23 июня 2011 года, пунктиром показана траектория спутника CALIPSO; в) Общая картина суточных сегментов траекторий на 20 июня 2011 года в сопоставлении с данными спутниковых наблюдений SO_2 на этот же день. Около траекторий подписаны их высоты в километрах.

Через неделю после извержения, 20 июня, часть воздушных масс, стартовавшая на высоте 17 км над вулканом, достигла Владивостока, имея высоту около 16 км (рис.2б). В этот же день по данным лидарных измерений над Владивостоком появился пик аэрозольного рассеяния на высоте 16 км (рис.2а), что можно интерпретировать как появление вулканического аэрозоля. Этот же аэрозоль был зарегистрирован лидаром CALIPSO, траектория которого показана на рисунке (рис. 2б).

Наличие вулканических загрязнений над Владивостоком в этот день подтверждается спутниковыми данными измерений диоксида серы, согласно которым 20 июня над Владивостоком располагалось пятно загрязнения SO_2 от вулкана (рис.2с). При этом суточные отрезки траекторий, построенные для 20 июня 2011, в целом соответствуют пятнам загрязнения SO_2 , наблюдавшегося со спутника.

В течение месяца наблюдалось хорошее соответствие между высотами аэрозольных слоев, полученными при лидарных наблюдениях, и высотами изоэнтропических траекторий, начавшимися в момент извержения над Набро на высотах 11-17 км. Причем некоторые из этих траекторий многократно совершили оборот вокруг центра Азиатского Антициклонического муссона, что можно интерпретировать как факт в пользу гипотезы, согласно которой первоначально продукты извержения Набро были заброшены вплоть до нижней стратосферы. Ведь согласно альтернативной гипотезе аэрозоль должен был подниматься с высот менее 14 км до стратосферы за счет глубокой конвекции при циркуляции в пределах области антициклона.

Траектории воздушных масс, стартовавшие с близких высот 17-19 км над вулканом Набро, через несколько дней разошлись между собой на 1000 км. Одна часть, как описано выше, ушла к Владивостоку, а другая часть – к Томску. Эта часть воздушных масс, стартовавшая на высоте 18,5 км над вулканом, достигла Томска 21 июня, и пребывала над Томском до 23 июня (рис.2b), имея ту же высоту около 16 км. Этот аэрозоль был зафиксирован над Томском с помощью лидарной техники.

Заключение

Результаты моделирования движения воздушных масс от вулкана Касаточи, начиная с моментов извержения 7–8 августа 2008 г., качественно воспроизводят картину распределения диоксида серы, полученную со спутников. Сложная картина пятен загрязнений диоксидом серы получается за счет различий движения воздушных масс на разных высотах в тропосфере и стратосфере. Используемая нами методика расчета позволяет воспроизвести основные особенности распределения пятен загрязнения диоксида серы в атмосфере в течение одной–двух недель после извержения. Проведенные расчеты траекторий движения воздушных масс и сопоставление их с картиной загрязнения атмосферы диоксидом серы показали, что аэрозольные слои, наблюдавшиеся в Томске в августе 2008 года на высотах 8-12 км, связаны с извержениями вулканов Алеутских островов в июле-августе (Окмок, Кливленд и Касаточи). Слабо выраженные слои, наблюдавшиеся на высотах 18-22 км, были связаны с переносом воздушных масс из субтропической и умеренной зон.

Метод лагранжевых траекторий движения воздушных масс в атмосфере, которые были построены по данным спутниковых измерений скорости ветра в Северном полушарии, позволил связать между собой данные лидарных наземных наблюдений верхней тропосферы и стратосферы в Томске и Владивостоке, данные космического лидара CALIOP и спутниковую информацию с прибора GOME-2 о распределении диоксида серы в атмосфере Северного полушария для изучения распространения продуктов вулканического происхождения после извержения вулкана Набро в Эритрее в июне 2011 года.

Траектории воздушных масс, стартовавших с близких высот 17-19 км над вулканом Набро, через несколько дней разошлись между собой и, примерно через неделю после начала извержения, часть воздушных масс достигла Владивостока, а дру-

гая – Томска, имея высоты около 16 км. Наблюдавшиеся с помощью лидаров пики аэрозольного рассеяния над Владивостоком и Томском уверенно можно связать с распространением вулканического аэрозоля от вулкана Набро.

В течение примерно месяца после извержения Набро, согласно лидарным данным, полученным во Владивостоке и Томске, эруптивное облако аэрозоля появлялось в виде слоев на некоторых выделенных высотах, которые хорошо соответствуют высотам рассчитанных траекторий. Через два месяца после извержения, сформировался широкий пик аэрозольного рассеяния на высотах 14–19 км, что является результатом разброса вулканического аэрозоля над Северным полушарием.

Наши исследования подтверждают обсуждаемую в литературе гипотезу о том, что первоначально продукты извержения Набро были заброшены на высоты нижней стратосферы

Авторы благодарны Метеослужбе Великобритании (UK Met Office) за предоставленные данные.

Список литературы/References

- [1] Черемисин А. А., Маричев В. Н., Новиков П. В., “Лидарные наблюдения вулканического аэрозоля в атмосфере над Томском”, *Метеорология и гидрология*, 2011, № 9, 46–56. [Cheremisin A. A., Marichev V. N., Novikov P. V., “Lidarnyye nablyudeniya vulkanicheskogo aerolya v atmosfere nad Tomskom”, *Meteorologiya i gidrologiya*, 2011, № 9, 46–56, (in Russian)].
- [2] Черемисин А. А., Маричев В. Н., Новиков П. В., Павлов А. Н., Шмирко К. А., Бочковский Д. А., “Оценка переноса вулканического аэрозоля в стратосфере над Томском и Владивостоком в 2011 году по данным лидарных наблюдений”, *Метеорология и гидрология*, 2019, № 5, 50–62. [Cheremisin A. A., Marichev V. N., Novikov P. V., Pavlov A. N., Shmirko K. A., Bochkovskiy D. A., “Otsenka perenosa vulkanicheskogo aerolya v stratosfere nad Tomskom i Vladivostokom v 2011 godu po dannym lidarnykh nablyudeniyy”, *Meteorologiya i gidrologiya*, 2019, № 5, 50–62, (in Russian)].
- [3] Черемисин А. А., Маричев В. Н., Новиков П. В., “Перенос полярных стратосферных облаков из Арктики к Томску в январе 2010 г.”, *Оптика атмосферы и океана*, **26:2** (2013), 93–99. [Cheremisin A. A., Marichev V. N., Novikov P. V., “Perenos polyarnykh stratosfernykh oblakov iz Arktiki k Tomsku v yanvare 2010 g.”, *Optika atmosfery i okeana*, **26:2** (2013), 93–99, (in Russian)].
- [4] Cheremisin A. A., Marichev V. N., Novikov P. V., Barashkov T. O., Bochkovsky D. A., “Analysis of polar stratospheric cloud observations at Tomsk in January 2016”, *Proc. SPIE*, **10035** (2016), 100355X-1–100355X-5.
- [5] Иванов В. Н., Зубачев Д. С., Коршунов В. А. и др., “Лидарные наблюдения стратосферных аэрозольных следов от Челябинского метеорита”, *Оптика атмосферы и океана*, **27:2** (2014), 117–122. [Ivanov V. N., Zubachev D. S., Korshunov V. A. i dr., “Lidarnyye nablyudeniya stratosfernykh aeroly’nykh sledov ot Chelyabinskogo meteorita”, *Optika atmosfery i okeana*, **27:2** (2014), 117–122, (in Russian)].
- [6] *Eruption of the Kasatochi volcano on the Aleutian Islands*, <http://sacs.aeronomie.be/cases/kasatochi.php>.
- [7] Cheremisin A. A., Shnipov I. S., Horvath H., Rohatschek H., “The global picture of aerosol layers formation in the stratosphere and in the mesosphere under the influence of gravitophoretic and magneto-photophoretic forces”, *Geophys. Res.*, **116** (2011), D19204.
- [8] Kerminen V.-M., Niemi J. V., Timonen H. et al., “Characterization of a volcanic ash episode in southern Finland caused by the Grimsvötn eruption in Iceland in May 2011”, *Atmos. Chem. Phys.*, **11** (2011), 12227–12239.
- [9] Kvietkus K., Šakalys J., Didžbalis J. et al., “Atmospheric aerosol episodes over Lithuania after the May 2011 volcano eruption at Grimsvötn, Iceland”, *Atmospheric Research*, **122** (2013), 93–101.

- [10] Bourassa A., Robock A., Randel W. et al., "Large Volcanic Aerosol Load in the Stratosphere Linked to Asian Monsoon Transport", *Science*, **337** (2012), 78–81.
- [11] CALIPSO Science Team, *CALIPSO/CALIOP Level 1B, Lidar Profile Data, version 3.02*, Hampton, VA, USA: NASA Atmospheric Science Data Center (ASDC), https://eosweb.larc.nasa.gov/project/calipso/cal_lid_11-valstage1-v3-02_table.
- [12] Fromm M., Nedoluha G., Charvát Z., "Comment on "Large Volcanic Aerosol Load in the Stratosphere Linked to Asian Monsoon Transport"", *Science*, **339**:6120 (2013), 647.
- [13] Vernier J.-P., Thomason L. W., Fairlie T. D. et al., "Comment on "Large Volcanic Aerosol Load in the Stratosphere Linked to Asian Monsoon Transport"", *Science*, **339**:6120 (2013), 647.
- [14] Khaykin S. M., Godin-Beekmann S., Keckhut P. et al., "Variability and evolution of the midlatitude stratospheric aerosol budget from 22 years of ground-based lidar and satellite observations", *Atmos. Chem. Phys.*, **17** (2017), 1829–1845.
- [15] Clarisse L., Coheur P.-F., Theys N. et al., "The 2011 Nabro eruption, a SO_2 plume height analysis using IASI measurements", *Atmos. Chem. Phys.*, **14** (2014), 3095–3111.
- [16] Sawamura P., Vernier J. P., Barnes J. E. et al., "Stratospheric AOD after the 2011 eruption of Nabro volcano measured by lidars over the Northern Hemisphere", *Environmental Res. Lett.*, **7** (2012), 034013.
- [17] Fairlie T. D., Vernier J.-P., Natarajan M., Bedka K. M., "Dispersion of the Nabro volcanic plume and its relation to the Asian summer monsoon", *Atmos. Chem. Phys.*, **14** (2014), 7045–7057.
- [18] Zhuang J., Yi F., "Nabro aerosol evolution observed jointly by lidars at a mid-latitude site and CALIPSO", *Atmospheric Environment*, **140** (2016), 106–116.

Список литературы (ГОСТ)

- [1] Черемисин А. А., Маричев В. Н., Новиков П. В. Лидарные наблюдения вулканического аэрозоля в атмосфере над Томском // Метеорология и гидрология. 2011. №9. С. 46–56.
- [2] Черемисин А. А., Маричев В. Н., Новиков П. В., Павлов А. Н., Шмирко К. А., Бочковский Д. А. Оценка переноса вулканического аэрозоля в стратосфере над Томском и Владивостоком в 2011 году по данным лидарных наблюдений // Метеорология и гидрология. 2019. №5. С. 50–62.
- [3] Черемисин А. А., Маричев В. Н., Новиков П. В. Перенос полярных стратосферных облаков из Арктики к Томску в январе 2010 г. // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. №2. С. 93–99.
- [4] Cheremisin A. A., Marichev V. N., Novikov P. V., Barashkov T. O., Bochkovsky D. A. Analysis of polar stratospheric cloud observations at Tomsk in January 2016 // Proc. SPIE. 2016. vol. 10035. 100355X-1–100355X-5
- [5] Иванов В. Н., Зубачев Д. С., Коршунов В. А. и др. Лидарные наблюдения стратосферных аэрозольных следов от Челябинского метеорита // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. №2. С. 117–122.
- [6] Eruption of the Kasatochi volcano on the Aleutian Islands <http://sacs.aeronomie.be/cases/kasatochi.php>.
- [7] Cheremisin A. A., Shnipov I. S., Horvath H., Rohatschek H. The global picture of aerosol layers formation in the stratosphere and in the mesosphere under the influence of gravitophoretic and magneto-photophoretic forces // Geophys. Res. 2011. vol. 116. D19204.
- [8] Kerminen V.-M., Niemi J. V., Timonen H. et al. Characterization of a volcanic ash episode in southern Finland caused by the Grimsvötn eruption in Iceland in May 2011 // Atmos. Chem. Phys. 2011. vol. 11. pp. 12227–12239.
- [9] Kvietkus K., Šakalys J., Didžbalis J. et al. Atmospheric aerosol episodes over Lithuania after the May 2011 volcano eruption at Grimsvötn, Iceland // Atmospheric Research. 2013. vol. 122. pp. 93–101.

- [10] Bourassa A., Robock A., Randel W. et al. Large Volcanic Aerosol Load in the Stratosphere Linked to Asian Monsoon Transport // *Science*. 2012. vol. 337. pp. 78–81.
- [11] CALIPSO Science Team. CALIPSO/CALIOP Level 1B, Lidar Profile Data, version 3.02 Hampton, VA, USA: NASA Atmospheric Science Data Center (ASDC), https://eosweb.larc.nasa.gov/project/calipso/cal_lid_l1-valstage1-v3-02_table.
- [12] Fromm M., Nedoluha G., Charvát Z. Comment on “Large Volcanic Aerosol Load in the Stratosphere Linked to Asian Monsoon Transport” // *Science*. 2013. vol. 339. no. 6120.
- [13] Vernier J.-P., Thomason L. W., Fairlie T. D. et al. Comment on “Large Volcanic Aerosol Load in the Stratosphere Linked to Asian Monsoon Transport” // *Science*. 2013. vol. 339. no. 6120.
- [14] Khaykin S. M., Godin-Beekmann S., Keckhut P. et al. Variability and evolution of the midlatitude stratospheric aerosol budget from 22 years of ground-based lidar and satellite observations // *Atmos. Chem. Phys.* 2017. vol. 17. pp. 1829–1845.
- [15] Clarisse L., Coheur P.-F., Theys N. et al. The 2011 Nabro eruption, a SO_2 plume height analysis using IASI measurements // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. vol. 14. pp. 3095–3111.
- [16] Sawamura P., Vernier J. P., Barnes J. E. et al. Stratospheric AOD after the 2011 eruption of Nabro volcano measured by lidars over the Northern Hemisphere // *Environmental Res. Lett.* 2012. vol. 7. 034013.
- [17] Fairlie T. D., Vernier J.-P., Natarajan M., Bedka K. M. Dispersion of the Nabro volcanic plume and its relation to the Asian summer monsoon // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. vol. 14. pp. 7045–7057.
- [18] Zhuang J., Yi F. Nabro aerosol evolution observed jointly by lidars at a mid-latitude site and CALIPSO // *Atmospheric Environment*. 2016. vol. 140. pp. 106–116.

Для цитирования: Черемисин А. А., Маричев В. Н., Новиков П. В., Бочковский Д. А. Перенос стратосферного аэрозоля вулканического происхождения на Западной Сибирью в 2008-2017 годах согласно данным траекторного анализа и лидарных наблюдений // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2019. Т. 29. № 4. С. 208-217. DOI: 10.26117/2079-6641-2019-29-4-208-217

For citation: Cheremisin A. A., Marichev V. N., Novikov P. V., Bochkovski D. A. Transfer of the stratospheric aerosol of the volcanic origin over Western Siberia in 2008-2017 according to the data of trajectory analysis and lidar observations, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*. 2019, **29**: 4, 208-217. DOI: 10.26117/2079-6641-2019-29-4-208-217

Поступила в редакцию / Original article submitted: 18.10.2019

DOI: 10.26117/2079-6641-2019-29-4-208-217

MSC 86A10

TRANSFER OF THE STRATOSPHERIC AEROSOL OF THE VOLCANIC ORIGIN OVER WESTERN SIBERIA IN 2008-2017 ACCORDING TO THE DATA OF TRAJECTORY ANALYSIS AND LIDAR OBSERVATIONS¹

**A. A. Cheremisin¹, V. N. Marichev², P. V. Novikov³,
D. A. Bochkovskiy²**

¹ Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS, 630090, Novosibirsk, Instiutskaya st., 3

² V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 634055, Tomsk, Academician Zuev square, 1

³ Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, 660028, Krasnoyarsk, Lado Ketskhoveri st., 89

E-mail: aacheremisin@gmail.com, marichev@iao.ru, novikov-pv@yandex.ru, moto@iao.ru

During the ten-year period from 2008 to 2019 lidar observations of the stratospheric aerosol in Tomsk were carried out at the high-altitude sounding station of the IOA SB RAS. During this period, it was possible to register layers of volcanic aerosol resulting from the eruption of a number of volcanoes. The method of Lagrangian trajectories of air mass movement in the atmosphere based on satellite measurements of wind speed in the Northern Hemisphere made it possible to relate data from lidar ground-based observations of the upper troposphere and stratosphere in Tomsk and Vladivostok, CALIOP space lidar data and satellite information from the GOME-2 instrument distribution of sulfur dioxide in the atmosphere of the Northern Hemisphere. In this work, this is shown by the example of the eruption of the Kasatochi and Nabro volcanoes.

Key words: air mass trajectories, aerosol, volcano, stratosphere, lidar

© Cheremisin A. A. et al., 2019

¹This work was financially supported by the RFBR grant No. 19-45-700008 and the grant of the president MK-4592.2018.8.