Динамика содержания диоксида азота в атмосфере над Казахстаном по данным наземных наблюдений и спутникового зондирования

А. Х. Ахмеджанов, Т. К. Караданов

*Национальный центр космических исследований и технологий
Алматы, 050010, Республика Казахстан
E-mail: atmosphere@spaceres.kz*

По данным Казгидромета, наиболее высокие значения наземной концентрации диоксида азота наблюдаются в городах Нур-Султан, Караганда, Алматы и Тараз. Эти города попали в зоны повышенного содержания диоксида азота в атмосферном столбе по территории Казахстана за 2018 г., что показывает удовлетворительное согласие наземных измерений и данных дистанционного зондирования. По спутниковым данным, в тёплые периоды 2016–2018 гг. содержание в атмосферном столбе диоксида азота было максимальным, в холодные — минимальным. При этом в холодное время года амплитуды изменений были максимальными, в тёплое время интервал изменений оказался минимальным. Анализ спутниковых данных сенсора OMI за период с 2005 по 2019 г. показал, что увеличение содержания диоксида азота в атмосферном столбе по территории Казахстана в среднем составило 8,57 %.

Ключевые слова: атмосфера, малые газы, диоксид азота, содержание, атмосферный столб, дистанционное зондирование

Одобрена к печати: 29.01.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-245-251

Введение

Развитие промышленного производства и транспортных систем на территории Казахстана сопровождается ростом загрязнения атмосферы в результате эмиссии различных газовых примесей, в том числе окислов азота. Состояние загрязнённости атмосферы диоксидом азота (NO_2) зависит от большого количества источников эмиссии этого газа в атмосферу, которые могут быть природного и антропогенного происхождения. Основным источником NO_2 служит сжигание органического топлива. В природе он образуется в заметных количествах при степных, лесных, торфяных и угольных пожарах. В современных городах концентрации диоксида азота могут многократно превышать предельно допустимые нормы. Оксиды азота являются одним из основных загрязнителей атмосферы и увеличивают кислотность осадков. Оценка интегрального содержания NO_2 в пограничном слое атмосферы по наблюдениям рассеянной в зените солнечного излучения радиации дана в работе (Иванов, Постыляков, 2010). Результаты анализа спутниковых наблюдений тропосферного содержания NO_2 над Московским регионом представлены в публикации (Ситнов, 2011). Около 40 % загрязнений оксидами азота производится из точечных источников на электростанциях (Majumder et al., 2008). В последние годы при решении задач количественной и качественной оценки распространения газов, загрязняющих атмосферу, применяются данные спутникового зондирования. Результаты исследования возможности использования спутниковой информации для восстановления концентраций различных газов в атмосфере с целью их мониторинга представлены в работе (Тронин и др., 2009). Приведены примеры картирования тропосферного NO_2 на территории Российской Федерации (Ионов, Тимофеев, 2009). Пространственное распределение концентрации газа в воздушном бассейне региона носит широтный характер с уменьшением значений в юго-восточном и северном направлениях (Русскова, Зенкова, 2018). В исследовании (Иванов и др., 2011) представлены первые результаты разработки нового метода восстановления профиля NO_2 по сумеречным наблюдениям. Для стратосферы точность восстановления содержания NO_2 была около 10 %. Сравнение стратосферного

содержания NO_2 , восстановленного в Институте физики атмосферы Российской академии наук, показало, что данные в целом хорошо согласуются. Сравнение результатов наземных наблюдений на Звенигородской научной станции и данных измерений с помощью прибора ОМІ на борту спутника EOS-Aura при пролётах над станцией выявило, что среднее расхождение значений «незагрязнённой» (главным образом стратосферной) части общего содержания NO_2 за весь срок совместных наблюдений находится в пределах ошибок измерений. Однако в летний период значения концентрации NO_2 , получаемые по спутниковым данным, ниже значений наземных наблюдений, а в зимний период — выше. Высокая корреляция между наземными и спутниковыми данными в значительной степени обусловлена годовым ходом NO_2 (Груздев, Елохов, 2009).

Диоксид азота отличается относительно продолжительным периодом существования в атмосфере. Выбросы NO_2 считаются одной из основных причин образования фотохимического смога. Соединяясь с парами воды в атмосфере, они образуют азотную кислоту и вместе с оксидами серы становятся причиной образования кислотных дождей. В южных районах, где интенсивность солнечной радиации велика, в отдельные периоды происходит резкое повышение концентрации диоксида азота или окиси азота (NO) в атмосфере. По указанной выше причине отмечено увеличение среднего уровня загрязнения воздуха диоксидом азота в зависимости от широты места: с севера на юг — почти на 60 %. В районах, где осадки выпадают часто, концентрация NO_2 снижается и отношение NO/NO_2 возрастает.

В крупных промышленных центрах Республики Казахстан проводится мониторинг состояния атмосферного воздуха на основе системы постоянных наземных наблюдений. В системе национальной гидрометеорологической службы наблюдения за состоянием окружающей среды выполняется мониторинг в соответствии с Экологическим кодексом Республики Казахстан, включающий наблюдения за загрязнением наземного атмосферного воздуха во всех крупных населённых пунктах. Выпущены информационные бюллетени о состоянии окружающей среды за 2016–2018 гг. с данными измерений загрязняющих веществ в атмосфере во всех городах Республики Казахстан (<https://kazhydromet.kz/ru/bulleten/okrsreda>). На сегодня актуальным является изучение содержания в атмосфере загрязняющих веществ от природных источников и возникающих чрезвычайных ситуаций в виде степных и лесных пожаров вне городов и промышленных объектов.

Целью данной работы является определение особенностей распределения диоксида азота на территории Казахстана на основе наземных измерений и данных дистанционного зондирования Земли из космоса.

Данные наземных наблюдений

По данным Казгидромета о состоянии окружающей среды за 2016–2018 гг. в 38 городах Республики Казахстан было определено, что высокие концентрации диоксида азота наблюдаются в четырёх городах: Нур-Султан, Алматы, Тараз, Караганда. По результатам измерений построен график изменения концентрации NO_2 в этих городах за рассматриваемый период (рис. 1, см. с. 247). Диапазон изменений средней концентрации газа составил 44–74 мкг/м^3 . Во второй половине 2018 г. наблюдалось понижение концентрации NO_2 в Нур-Султане и Алматы, а в Таразе — повышение. Наименьшие значения зафиксированы в Караганде.

На основе этих данных был выполнен статистический анализ наземного содержания NO_2 в воздушном бассейне (таблица) для указанных четырёх городов. Средние значения содержания NO_2 в Нур-Султане, Алматы и Таразе примерно одинаковы — около 70 мкг/м^3 , в Караганде — 44 мкг/м^3 . Структурные средние величины распределения концентрации NO_2 — средние, медианы и моды (наиболее вероятные значения) — примерно одинаковы для Нур-Султана, Алматы и Тараза, а в Караганде — несколько ниже. Стандартные ошибки распределения концентрации диоксида азота оказались самыми высокими в Нур-Султане и Алматы, самыми низкими — в Таразе. Значения медиан в Нур-Султане, Алматы и Таразе совпадают — около 70 мкг/м^3 , в Караганде составляют порядка 41 мкг/м^3 .

Рис. 1. Изменение концентрации диоксида азота в наиболее крупных городах Казахстана

Статистический анализ данных наземных наблюдений (мкг/м³)

	Нур-Султан	Алматы	Тараз	Караганда
Среднее	70	74	68	44
Стандартная ошибка	3	3	1	2
Медиана	70	70	70	41
Мода	60	100	70	50
Стандартное отклонение	21	23	9	13
Интервал	80	87	33	86
Минимум	30	40	54	14
Максимум	110	127	87	100

Данные дистанционного зондирования

Для оценки пространственно-временной изменчивости содержания NO_2 в атмосферном столбе были использованы многолетние данные измерений сенсора OMI, размещённого на спутнике Aura. Сглаженное распределение диоксида азота в атмосферном столбе по территории Казахстана за июль 2018 г. представлено на рис. 2 (см. с. 248). В целом по территории наблюдается широтное распределение содержания NO_2 в атмосферном столбе. Максимумы приходятся на север и юго-восток территории Казахстана. Выходным параметром данных дистанционного зондирования атмосферных газов является их содержание в атмосферном столбе, тогда как наземные измерения малых газов представляют данные об их наземной концентрации. Поэтому сравнение спутниковых данных и наземных наблюдений может быть качественным. Выбранные по наземным измерениям города Нур-Султан, Караганда, Алматы и Тараз, отмеченные на рис. 2, попадают в зоны повышенного содержания NO_2 в атмосферном столбе, что свидетельствует об удовлетворительном качественном соответствии данных дистанционного зондирования и наземных измерений.

Внутригодовые изменения содержания в атмосферном столбе диоксида азота за 2016–2018 гг. по спутниковым данным сенсора OMI показаны на рис. 3 (см. с. 248).

Рис. 2. Сглаженное распределение содержания диоксида азота в атмосферном столбе по территории Казахстана за июль 2018 г. по данным дистанционного зондирования. Отмечены города с повышенными концентрациями NO_2

Рис. 3. Внутригодовое изменение содержания в атмосферном столбе диоксида азота за 2016–2018 гг. по спутниковым данным сенсора OMI

Максимумы изменений по территории Казахстана наблюдаются летом (июль), минимумы — зимой (январь). В то же время в холодный период амплитуды изменений имеют максимумы, а в тёплый период интервал изменений минимальный. Статистический анализ показал, что среднее значение содержания NO_2 в атмосферном столбе по территории Казахстана составляет $3,67\text{e}+15$ мол/см², медиана — $3,72\text{e}+15$ мол/см², среднеквадратичное отклонение — $8,71\text{e}+14$ мол/см². Изменчивость содержания в атмосферном столбе NO_2 , усреднённого по территории, за 2005–2019 гг. показана на рис. 4 (см. с. 249). За исследуемый период

(13 лет) содержание диоксида азота в атмосферном столбе увеличилось на 8,57 %. Измерения концентрации газа в зимние месяцы могут иметь искажения из-за низкой освещённости. Поэтому был построен график изменения содержания NO_2 в атмосферном столбе по территории Казахстана в тёплые сезоны 2005–2019 гг. по спутниковым данным сенсора OMI (рис. 5). За этот период содержание диоксида азота в атмосферном столбе в тёплое время увеличилось на 8,6 %.

Рис. 4. Изменение содержания диоксида азота в атмосферном столбе по территории Казахстана за период с 01.10.2004 по 10.04.2019 по спутниковым данным сенсора OMI

Рис. 5. Изменение содержания диоксида азота в атмосферном столбе по территории Казахстана за тёплое время года по спутниковым данным сенсора OMI за период с 2005 по 2019 г.

Выводы

По данным Казгидромета, наиболее высокие значения наземной концентрации диоксида азота наблюдаются в городах Нур-Султан, Алматы, Тараз и Караганда. Эти города попали в зоны повышенного содержания NO_2 в атмосферном столбе по территории Казахстана за 2018 г., что показывает удовлетворительное согласие наземных измерений и данных дистанционного зондирования. По спутниковым данным, в тёплые периоды 2016–2018 гг.

содержание в атмосферном столбе диоксида азота было максимальным, в холодные — минимальным. При этом в холодное время года амплитуды изменений имели максимумы, а в тёплое время интервал изменений был минимальный. Анализ спутниковых данных сенсора ОМІ за период с 01.10.2004 по 19.04.2019 показал, что тренд увеличения содержания NO_2 в атмосферном столбе в среднем составил 8,57 %. За 2005–2019 гг. содержание диоксида азота в атмосферном столбе в тёплое время увеличилось на 8,6 %.

Исследования проведены в рамках грантового проекта № AP05135191 Министерства образования и науки Республики Казахстан «Исследовать особенности распределения малых газов, загрязняющих атмосферу, по территории Казахстана на основе данных дистанционного зондирования Земли из космоса».

Литература

1. Груздев А. Н., Елохов А. С. Валидация результатов измерений содержания NO_2 в вертикальном столбе атмосферы с помощью прибора ОМІ с борта спутника EOS-Aura по данным наземных измерений на Звенигородской научной станции // Изв. Российской акад. наук. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 4. С. 477–488.
2. Иванов В. А., Постыляков О. В. Оценка интегрального содержания NO_2 в пограничном слое атмосферы по наблюдениям рассеянной в зените солнечной радиации // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23. № 06. С. 471–474.
3. Иванов В. А., Елохов А. С., Постыляков О. В. О восстановлении вертикального профиля двуокиси азота в атмосфере Земли по сумеречным измерениям рассеянного в зените солнечного излучения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 263–268.
4. Ионов Д. В., Тимофеев Ю. М. Региональный космический мониторинг содержания двуокиси азота в тропосфере // Изв. Российской акад. наук. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 4. С. 467–476.
5. Русскова Т. В., Зенкова П. Н. Содержание диоксида азота в тропосфере Западной Сибири по данным спутниковых наблюдений. Пространственно-временная изменчивость // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 221–2358.
6. Ситнов С. Анализ спутниковых наблюдений тропосферного содержания NO_2 над Московским регионом // Изв. Российской акад. наук. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 2. С. 184–203.
7. Тронин А. А., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш. Диоксид азота в воздушном бассейне России по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Вып. 6. Т. 2. С. 217–223.
8. Majumder A. K., Murthy V. M., Khanal S. N., Giri D. NO_2 concentration in Banepa valley, Nepal // Kathmandu University J. Science, Engineering and Technology. 2008. V. 1. No. V. P. 1–11. DOI: 10.3126/kuset.v4i1.2878.

Dynamics of nitrogen dioxide in the atmosphere of Kazakhstan based on ground observations and remote sensing data

A. Kh. Akhmedzhanov, T. K. Karadanov

National Center for Space Research and Technology
Almaty 050010, Republic of Kazakhstan
E-mail: atmosphere@spaceres.kz

According to Kazhydromet data, the most elevated values of ground concentration of nitrogen dioxide are observed in the cities of Nur-Sultan, Karaganda, Almaty, Taraz. These cities were included in the zones of high nitrogen dioxide content in the atmospheric column on the territory

of Kazakhstan in 2018. This shows a satisfactory agreement of ground measurements and remote sensing data analysis. According to satellite data for 2016–2018, the nitrogen dioxide content in the atmospheric column is maximal in the warm season and minimal in the cold season. In the cold period the amplitude of changes are maximal, in the warm period the interval of changes is minimal. Analysis of OMI sensor data for the period from 2005 to 2019 showed an average increase of 8.57 % in the value of nitrogen dioxide in the atmospheric column on the territory of Kazakhstan.

Keywords: atmosphere, small gases, nitrogen dioxide, content, atmospheric column, remote sensing

Accepted: 29.01.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-245-251

References

1. Gruzdev A. N., Elokhov A. S., Validatsiya rezul'tatov izmerenii sodержaniya NO_2 v vertikal'nom stolbe atmosfery s pomoshch'yu pribora OMI s borta sputnika EOS-Aura po dannym nazemnykh izmerenii na Zvenigorodskoi nauchnoi stantsii (Validation of the results of measurements of NO_2 content in the vertical column of the atmosphere using the OMI instrument from the EOS-Aura satellite based on ground measurements at the Zvenigorod scientific station), *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, 2009, Vol. 45, No. 4, pp. 477–488.
2. Ivanov V. A., Postilyakov O. V., Otsenka integral'nogo sodержaniya NO_2 v pogranichnom sloe atmosfery po nablyudeniyam rasseyannoi v zenite solnechnoi radiatsii (Estimation of the integral content of NO_2 in the boundary layer of the atmosphere from observations of solar radiation scattered at the Zenith), *Optika atmosfery i okeana*, 2010, Vol. 23, No. 06, pp. 471–474.
3. Ivanov V. A., Elokhov A. S., Postilyakov O. V., O vosstanovlenii vertikal'nogo profilya dvoukisi azota v atmosfere Zemli po sumerechnym izmereniyam rasseyannogo v zenite solnechnogo izlucheniya (On the restoration of the vertical profile of nitrogen dioxide in the Earth's atmosphere by twilight measurements of solar radiation), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 3, pp. 263–268.
4. Ionov D. V., Timofeev Yu. M., Regional'nyi kosmicheskii monitoring sodержaniya dvoukisi azota v troposfere (Regional space monitoring of nitrogen dioxide in the troposphere), *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, 2009, Vol. 45, No. 4, pp. 467–476.
5. Russkova T. V., Zenkova P. N., Soderzhanie dioksida azota v troposfere Zapadnoi Sibiri po dannym sputnikovykh nablyudenii. Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' (The content of nitrogen dioxide in the troposphere of Western Siberia according to satellite observations), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 7, pp. 221–2358.
6. Sitnov S., Analiz sputnikovykh nablyudenii troposfernogo sodержaniya NO_2 nad Moskovskim regionom (Analysis of satellite observations of tropospheric content NO_2 over the Moscow region), *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, 2011, Vol. 47, No. 2, pp. 184–203.
7. Tronin A. A., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Dioksid azota v vozdushnom basseine Rossii po sputnikovym dannym (Nitrogen dioxide in the air basin of Russia according to satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2009, Vol. 6, No. 2, pp. 217–223.
8. Majumder A. K., Murthy V. M., Khanal S. N., Giri D., NO_2 concentration in Banepa valley, Nepal, *Kathmandu University J. Science, Engineering and Technology*, 2008, Vol. 1, No. 5, pp. 1–11, DOI: 10.3126/kuset.v4i1.2878.